



Résilience systémique d'un territoire composé d'activités essentielles suite à une perturbation majeure – Approches systémique et spatiale

Benjamin Rey

► To cite this version:

Benjamin Rey. Résilience systémique d'un territoire composé d'activités essentielles suite à une perturbation majeure – Approches systémique et spatiale. Autre. Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne, 2015. Français. NNT : 2015EMSE0781 . tel-01229389

HAL Id: tel-01229389

<https://theses.hal.science/tel-01229389>

Submitted on 19 Nov 2015

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



NNT : 2015 EMSE 0781

THÈSE

présentée par

Benjamin REY

pour obtenir le grade de

Docteur de l'École Nationale Supérieure des Mines de Saint-Étienne

Spécialité : Génie de l'Environnement

**Résilience systémique d'un Territoire composé d'Activités Essentielles suite à
une perturbation majeure - Approches systémique et spatiale**

soutenue à Alès, le 2 avril 2015

Membres du jury

Président :	Valérie LAFOREST	Professeur, Ecole Nationale Supérieure des mines de Saint Etienne
Rapporteurs :	Benoit ROBERT	Professeur Titulaire, Ecole Polytechnique de Montréal
	Jean-François BRILHAC	Professeur, Université de Haute-Alsace
Examineur :	Jean-Marc MERCANTINI	Maître de Conférence, Ecole Polytechnique Universitaire de Marseille.
	Emmanuel LAPEBIE	Ingénieur de Recherche, CEA Gramat
Directeur de thèse :	Gilles DUSSERRE	Directeur de Recherche, Ecole des mines d'Alès
Encadrants :	Jerome TIXIER	Maître-assistant, Ecole des mines d'Alès
	Aurélia BONY-DANDRIEUX	Maître-assistant, Ecole des mines d'Alès

Spécialités doctorales	Responsables :		Spécialités doctorales	Responsables
SCIENCES ET GENIE DES MATERIAUX MECANIQUE ET INGENIERIE GENIE DES PROCÉDES SCIENCES DE LA TERRE SCIENCES ET GENIE DE L'ENVIRONNEMENT	K. Wolski Directeur de recherche S. Drapier, professeur F. Gruy, Maître de recherche B. Guy, Directeur de recherche D. Graillet, Directeur de recherche		MATHEMATIQUES APPLIQUEES INFORMATIQUE IMAGE, VISION, SIGNAL GENIE INDUSTRIEL MICROELECTRONIQUE	O. Roustant, Maître-assistant O. Boissier, Professeur JC. Pinoli, Professeur A. Dulgu, Professeur S. Dauzere Peres, Professeur
EMSE : Enseignants-chercheurs et chercheurs autorisés à diriger des thèses de doctorat (titulaires d'un doctorat d'État ou d'une HDR)				
ABSI	Nabil	CR	Génie industriel	CMP
AVRIL	Stéphane	PR2	Mécanique et ingénierie	CIS
BALBO	Flavien	PR2	Informatique	FAYOL
BASSEREAU	Jean-François	PR	Sciences et génie des matériaux	SMS
BATTON-HUBERT	Mireille	PR2	Sciences et génie de l'environnement	FAYOL
BERGER DOUCE	Sandrine	PR2	Sciences de gestion	FAYOL
BERNACHE-ASSOLLANT	Dudier	PR0	Génie des Procédés	CIS
BIGOT	Jean Pierre	MR(DR2)	Génie des Procédés	SPIN
BILAL	Essaid	DR	Sciences de la Terre	SPIN
BLAYAC	Sylvain	MA(MDC)	Microélectronique	CMP
BOISSIER	Olivier	PR1	Informatique	FAYOL
BORBELY	Andras	MR(DR2)	Sciences et génie des matériaux	SMS
BOUCHER	Xavier	PR2	Génie Industriel	FAYOL
BRODHAG	Christian	DR	Sciences et génie de l'environnement	FAYOL
BRUCHON	Julien	MA(MDC)	Mécanique et ingénierie	SMS
BURLAT	Patrick	PR1	Génie Industriel	FAYOL
COURNIL	Michel	PR0	Génie des Procédés	DIR
DARRIEULAT	Michel	IGM	Sciences et génie des matériaux	SMS
DAUZERE-PERES	Stéphane	PR1	Génie Industriel	CMP
DEBAYLE	Johan	CR	Image Vision Signal	CIS
DELAFOSSÉ	David	PR0	Sciences et génie des matériaux	SMS
DESRAYAUD	Christophe	PR1	Mécanique et ingénierie	SMS
DOLGUI	Alexandre	PR0	Génie Industriel	FAYOL
DRAPIER	Sylvain	PR1	Mécanique et ingénierie	SMS
FEILLET	Dominique	PR1	Génie Industriel	CMP
FEVOTTE	Gilles	PR1	Génie des Procédés	SPIN
FRACZKIEWICZ	Anna	DR	Sciences et génie des matériaux	SMS
GARCIA	Daniel	MR(DR2)	Génie des Procédés	SPIN
GERINGER	Jean	MA(MDC)	Sciences et génie des matériaux	CIS
GOEURJOT	Dominique	DR	Sciences et génie des matériaux	SMS
GRAILLLOT	Dudier	DR	Sciences et génie de l'environnement	SPIN
GROSSEAU	Philippe	DR	Génie des Procédés	SPIN
GRUY	Frédéric	PR1	Génie des Procédés	SPIN
GUY	Bernard	DR	Sciences de la Terre	SPIN
HAN	Woo-Suck	MR	Mécanique et ingénierie	SMS
HERRI	Jean Michel	PR1	Génie des Procédés	SPIN
KERMOUCHE	Guillaume	PR2	Mécanique et Ingénierie	SMS
KLOCKER	Helmut	DR	Sciences et génie des matériaux	SMS
LAFOREST	Valérie	MR(DR2)	Sciences et génie de l'environnement	FAYOL
LERICHE	Rodolphe	CR	Mécanique et ingénierie	FAYOL
LI	Jean-Michel		Microélectronique	CMP
MALLIARAS	Georges	PR1	Microélectronique	CMP
MAURINE	Philippe			CMP
MOLIMARD	Jérôme	PR2	Mécanique et ingénierie	CIS
MONTHEILLET	Frank	DR	Sciences et génie des matériaux	SMS
MOUTTE	Jacques	CR	Génie des Procédés	SPIN
NEUBERT	Gilles			FAYOL
NIKOLOVSKI	Jean-Pierre	Ingénieur de recherche		CMP
NORTIER	Patrice	PR1		SPIN
PIJOLAT	Christophe	PR0	Génie des Procédés	SPIN
PIJOLAT	Michèle	PR1	Génie des Procédés	SPIN
PINOLI	Jean Charles	PR0	Image Vision Signal	CIS
POURCHEZ	Jérémy	MR	Génie des Procédés	CIS
ROBISSON	Bruno	Ingénieur de recherche		CMP
ROUSSY	Agnès	MA(MDC)	Génie industriel	CMP
ROUSTANT	Olivier	MA(MDC)	Mathématiques appliquées	FAYOL
ROUX	Christian	PR	Image Vision Signal	CIS
STOLARZ	Jacques	CR	Sciences et génie des matériaux	SMS
TRIA	Assia	Ingénieur de recherche	Microélectronique	CMP
VALDIVIESO	François	PR2	Sciences et génie des matériaux	SMS
VIRICELLE	Jean Paul	DR	Génie des Procédés	SPIN
WOLSKI	Krzysztof	DR	Sciences et génie des matériaux	SMS
XIE	Xiaolan	PR1	Génie industriel	CIS
YUGMA	Gallian	CR	Génie industriel	CMP
ENISE : Enseignants-chercheurs et chercheurs autorisés à diriger des thèses de doctorat (titulaires d'un doctorat d'État ou d'une HDR)				
BERGHEAU	Jean-Michel	PU	Mécanique et Ingénierie	ENISE
BERTRAND	Philippe	MCF	Génie des procédés	ENISE
DUBUJET	Philippe	PU	Mécanique et Ingénierie	ENISE
FEULVARCH	Eric	MCF	Mécanique et Ingénierie	ENISE
FORTUNIER	Roland	PR	Sciences et Génie des matériaux	ENISE
GUSSAROV	Andrey	Enseignant contractuel	Génie des procédés	ENISE
HAMDI	Hédi	MCF	Mécanique et Ingénierie	ENISE
LYONNET	Patrick	PU	Mécanique et Ingénierie	ENISE
RECH	Joël	PU	Mécanique et Ingénierie	ENISE
SMUROV	Igor	PU	Mécanique et Ingénierie	ENISE
TOSCANO	Rosario	PU	Mécanique et Ingénierie	ENISE
ZAHOUANI	Hassan	PU	Mécanique et Ingénierie	ENISE

Mise à jour : 28/10/2014



« En bas, tu n'aurais peut-être pas cru, tandis qu'ici... Ici, on ne peut pas mentir! On ne ment jamais en haute montagne. »

Roger Frison-Roche

Remerciements

Je tiens tout d'abord à exprimer ma reconnaissance envers M. Benoît Robert et M. Jean-François Brilhac d'avoir accepté d'être rapporteurs. Merci pour les critiques exprimées de manière pédagogiques et encourageantes. Je remercie également Mme Valérie Laforest, M. Jean-Marc Mercantini et M. Emmanuel Lapebie de m'avoir fait l'honneur d'être membres du jury.

J'adresse également mes remerciements à Mr. Gilles Dusserre pour m'avoir accueilli au sein de l'Institut des Sciences des Risques. Je souhaite également remercier M. Dusserre pour la liberté qu'il m'a laissée dans mes choix de travail ainsi que pour son soutien dans l'ensemble des déplacements que j'ai pu effectuer durant ces années à l'Ecole des mines d'Alès.

Ma reconnaissance va également à Mr. Jérôme Tixier qui pendant ces trois ans a été à l'écoute, encourageant et m'a accordé sa confiance pour mener à bien cette thèse....de vulnérabilité et de résilience ou encore de résilience et de vulnérabilité sur les IC !!!!!

Je tiens également à remercier Mm Aurélia Bony-Dandrieux. Ce n'est peut-être pas très « galant » de terminer les remerciements de son encadrement de telle sorte, mais c'est davantage et non d'avantage pour te dire :

- Merci d'avoir à la fois pris ce chemin de thèse en court de route sans te disperser « atmosphériquement » mais aussi en apportant ton attention jusqu'aux derniers instants de la gestion de « crise rédactionnelle » ;
- Merci pour tes conseils réfléchis, justes et pertinents durant ces années de thèses et de spécialité MRE...je pense avoir gagné en apprentissage et donc être plus résilient face aux prochaines étapes !

Je tiens à exprimer ma gratitude également aux personnes qui m'ont accueilli pour de discussions riches en enseignement. Je tiens particulièrement à remercier M. Amar Medjber (ERDF Languedoc-Roussillon), M. Patrice La lumia (Centre hospitalier Alès-Cévennes), M. Frédéric Monnet (Régis des Eaux d'Alès), M. Jean-Marie Flaus (Institut National Polytechnique de Grenoble).

Je souhaite également remercier M. le Lieutenant-colonel Gérard Houtekier (EMZ-Sud) pour son aide précieuse dans l'acquisition de couches d'informations géographiques.

Mes remerciements vont aussi aux autres chercheurs de l'Ecole des mines d'Alès. Je remercie Vincent Chapurlat pour sa disponibilité et ses remarques. Pour l'Institut des Sciences des Risques, mes pensées vont à :

- Flo, merci pour ton soutien et ton implication dans ce travail. Je suis très reconnaissant du temps que tu m'as accordé et des critiques que tu as pu faire malgré tes craintes des mannequins en plastique...C'était un grand plaisir de partager ton expérience à tes côtés. Je vais maintenant essayer de me rendre indispensable...

- Sophie et Pierre-Alain pour votre aide et écoute sur mon travail. Je vous inonde de merci et à très bientôt autour d'une table de ravitaillement d'un trail cévenol !
- Les cobayes de la phénoménologie, j'ai nommé Pierre S., Lolo et Fred !!! Merci pour leur bonne humeur !! C'était 'REALLY NICE' de partager des moments en votre compagnie ;
- Pierre L. pour finir, le petit dernier en âge mais avec beaucoup de neurones artificiels et surtout naturels !!!! Merci co-bureau d'avoir partagé ta vision du jeu pendant ces trois années et aidé à aller au but !!! Tu as un bon « lobe » d'esprit et de critiques, merci également d'avoir été « le bras droit » d'Athema !! Rendez-vous sur les terrains de sport et festifs !

Un grand merci également à l'ensemble du personnel du LGEI pour ces trois années passées au laboratoire. Je salue particulièrement Domie et Coco pour leur aide précieuse et gentillesse mais aussi le polyglotte imperturbable Roro.

Je termine pour les Alésiens par remercier les doctorants avec qui j'ai passé des longs moments sur cette terrasse de l'ISR, du bureau ou de la colloc : Serge puis Chloé, Mélanie puis Fifou le beau shreck du 42, Olivier puis Noémie, Julie et Amélie, Dimitri, Tiboa&Caro, Guilherm « el tavuk » et tous les autres...Teshekur Ederim à tous pour les bons moments passés à Alès.

Spécial dédicace également à mon gitan breton et sa compagne charentaise/parisienne/alésienne, merci à vous pour ces trois ans et pour votre accueil dans les derniers instants !!! J'ai enfin trouvé les réponses aux questions que vous me posiez à table ? On en parle quand vous voulez !

J'ai également une pensée à toutes les personnes qui m'ont amené à réaliser cette thèse : maîtres de stage, anciens élèves de l'EMA,...merci à vous !

Je souhaite également remercier mon sponsor en Champagne et Vins, j'ai nommé « Rike ». Thanks for your advices et Santé ! Merci également à Pierre d'avoir ouvert la piste des thèses...merci de ne pas m'avoir vendu une piste noire directe !! Tu as le sens de la pédagogie. D'ailleurs, c'est quoi le pendage d'une piste de thèse ?

Pour finir, je remercie ma famille de vous êtes (REY)-unis pour venir assister à cette soutenance et de m'avoir adressé vos encouragements durant ces trois années.

Table des matières

REMERCIEMENTS.....	VII
TABLE DES MATIERES.....	IX
LISTE DES FIGURES.....	11
LISTE DES TABLEAUX.....	15
GLOSSAIRE.....	17
ACRONYMES.....	19
LISTE DES PARAMETRES.....	21
INTRODUCTION.....	25
PARTIE I : APPORTS DE CONNAISSANCES POUR LA CONSTRUCTION D'UNE METHODOLOGIE D'ANALYSE D'UN TERRITOIRE COMPOSE D'ACTIVITES ESSENTIELLES.....	35
I-1. LE TERRITOIRE ET LES INFRASTRUCTURES CRITIQUES DANS UN CONTEXTE DE GESTION DES RISQUES ET DES CRISES	36
I-1.1. <i>Notion de territoire.....</i>	36
I-1.2. <i>La gestion des risques et des crises sur le territoire.....</i>	38
I-1.3. <i>Considérer le territoire comme un système complexe.....</i>	46
I-1.4. <i>Description des systèmes techniques d'infrastructures critiques.....</i>	49
I-1.5. <i>Etat des lieux de la gestion des risques et des crises des infrastructures critiques.....</i>	55
I-1.6. <i>Synthèse.....</i>	66
I-2. ETUDE DES METHODOLOGIES D'ANALYSE DES INTERDEPENDANCES ENTRE INFRASTRUCTURES CRITIQUES.....	68
I-2.1. <i>Présentation des méthodologies.....</i>	68
I-2.3. <i>Identification des outils d'analyse des interdépendances entre infrastructures critiques.....</i>	74
I-2.4. <i>Secteurs d'activités et échelles d'application.....</i>	76
I-2.5. <i>Formalisme d'identification des données d'entrée et résultats.....</i>	82
I-2.6. <i>Etude des outils de l'approche prédictive.....</i>	84
I-2.7. <i>Etude des méthodologies de l'approche prédictive à partir du formalisme multidimensionnel.....</i>	88
I-2.8. <i>Synthèse.....</i>	97
PARTIE II : METHODOLOGIE D'EVALUATION DE L'IMPACT D'UNE PERTURBATION MAJEURE SUR UN TERRITOIRE COMPOSE D'ACTIVITES ESSENTIELLES – CONCEPTS, DEMARCHE ET APPLICATION.....	99
II-1. CONCEPTS METHODOLOGIQUES.....	100
II-1.1. <i>Démarche méthodologique.....</i>	100
II-1.2. <i>Définitions et description d'un Territoire composé d'Activités Essentielles.....</i>	103
II-1.3. <i>Propagation d'une perturbation majeure au sein du TcAE.....</i>	114
II-1.4. <i>Paramètres de demande et service.....</i>	117
II-1.5. <i>Caractéristiques des composants des chaînes essentielles et de la population.....</i>	119
II-1.6. <i>Définition de la résilience systémique d'un TcAE.....</i>	123
II-1.7. <i>Synthèse.....</i>	125
II-2. DEVELOPPEMENT DE LA DEMARCHE METHODOLOGIQUE D'ANALYSE DES INTERDEPENDANCES D'UN TcAE SUITE A UNE PERTURBATION MAJEURE.....	126
II-2.1. <i>Préambule.....</i>	126
II-2.2. <i>Modélisation du TcAE dans un environnement à risque, Etape A.....</i>	128
II-2.3. <i>Elaboration des scénarios de propagation, Etape B.....</i>	132
II-2.4. <i>Evaluation de la résilience systémique du TcAE, Etape C.....</i>	144

II-2.5. Synthèse.....	150
II-3. APPLICATION A UN TCAE PILOTE	155
II-3.1. Description du TcAE Pilote	155
II-3.2. Modèle restreint TcAE Pilote dans un environnement à risque.....	160
II-3.3. Elaboration et configuration des scénarios de propagation du TcAE Pilote.....	177
II-3.4. Evaluation de la résilience systémique, TcAE Pilote.....	183
DISCUSSION GENERALE ET CONCLUSION	193
BIBLIOGRAPHIE	198
ANNEXES.....	210
1A : ASSOCIATION METHODOLOGIES ET OUTILS D'ANALYSE DES INTERDEPENDANCES.....	211
1A ETUDE DES METHODOLOGIES DE L'APPROCHE EMPIRIQUE.....	212
(COMPLEMENT DU CHAPITRE 2).....	212
SOUS CATEGORIES DES DONNEES D'ENTREE DES OUTILS D'ANALYSE DES INTERDEPENDANCES	215
INTERDEPENDENCIES BETWEEN INDUSTRIAL INFRASTRUCTURES: TERRITORIAL VULNERABILITY ASSESSMENT.....	218
ACTIVITE ESSENTIELLE « GESTION DE L'EAU ».....	224
ACTIVITE ESSENTIELLE « SANTE »	229
ACTIVITE ESSENTIELLE « ACTIVITES CIVILES DE L'ETAT »	236
ACTIVITES ESSENTIELLES « ENERGIE »	239
ACTIVITE ESSENTIELLE « TRANSPORT »	249
EXTRAIT DES FONCTIONS UTILISEES DANS LE MODELE.....	256
EXTRAIT DES ELEMENTS ESSENTIELS UTILISES DANS LE MODELE.....	260
CARTES DES ELEMENTS ESSENTIELS DU TCAE PILOTE DE L'ACTIVITE ESSENTIELLE ENERGIE	264

Liste des figures

Figure 1 : Installations impactées directement par les séisme et tsunami au Japon en Mars 2011 (d'après MEDDE, 2013).....	26
Figure 2 : Conséquences indirectes sur différents secteurs d'activité japonais suite aux séisme et tsunami au Japon en Mars 2011 (d'après MEDDE, 2013)	27
Figure 3 : Schéma des interdépendances entre les infrastructures critiques (Rinaldi et al., 2001).....	29
Figure 4 : Liste des Secteurs d'Activités d'Importance Vitale (SAIV).....	31
Figure 5 : Impacts fonctionnels directs et indirects d'un évènement dans le temps.....	34
Figure 6 : Les différentes capacités de résilience urbaine (d'après UNISDR, 2012 ;Toubin et al., 2012)	41
Figure 7 : Cinq phases de la gestion des risques et des crises des territoires en France	42
Figure 8 : Systémographie d'un phénomène complexe non identifiable.....	47
Figure 9 : Liste des secteurs d'infrastructures critiques dans les politiques de protection (d'après Bouchon, 2011)	50
Figure 10 : Dispositif des Secteurs d'Activités d'Importance Vitale (SAIV) (d'après SGDSN, 2014).....	53
Figure 11 : Cadre d'analyse d'une méthodologie étudiant le comportement des IC interdépendantes.....	68
Figure 12 : Utilisation des outils d'analyse des interdépendances dans les méthodologies ..	75
Figure 13 : Radar des sous-secteurs activités étudiés dans les méthodologies.....	77
Figure 14 : Nombre de sous-secteurs d'activités appliqués dans les méthodologies	77
Figure 15: Pourcentage d'association entre un sous-secteur d'activités appliqué dans les méthodologies avec les autres sous-secteurs d'activités.....	78
Figure 16 : Application des sous-secteurs d'activités pour les huit outils d'analyse des interdépendances.....	79
Figure 17a et 17b : Echelles d'application des méthodologies	80
Figure 18 : Pourcentage d'association entre les sous-secteurs d'activités appliqués dans les méthodologies et les différentes échelles d'application.....	81
Figure 19 : Répartition de l'utilisation des outils d'analyse des interdépendances en fonction des échelles d'application.....	81

Figure 20 : Formalisme d'identification des données d'entrée et résultats de chaque outil d'analyse des interdépendances	82
Figure 21 : Formalisme de l'analyse multidimensionnelle des données entrée de l'approche prédictive.....	83
Figure 22 : Données d'entrée des catégories de capacité d'apprentissage et de résistance.	84
Figure 23 : Données d'entrée de la catégorie capacité d'absorption et de remise en service	85
Figure 24 : Dimensions des données d'entrée des capacités de résilience	86
Figure 25 : Données d'entrée via les critères des types d'interdépendances et types de défaillance	86
Figure 26 : Données d'entrée de la catégorie contexte social et économique des IC.....	87
Figure 27 : Typologie de résultats.....	87
Figure 28 : Données d'entrée et résultats des méthodologies utilisant le modèle non-opérabilité entrée-sortie	89
Figure 29 : Echelles spatiale et temporelle des résultats des pertes de service et économiques du modèle non-opérabilité entrée-sortie	89
Figure 30 : Données d'entrée (catégories 5 à 7) intégrées aux systèmes multi-agents et au formalisme de modélisation et simulation ad-hoc	91
Figure 31 : Données d'entrée (catégories 1 à 4) aux outils systèmes multi-agents et formalisme de modélisation et simulation ad-hoc.....	92
Figure 32 : Données d'entrée (catégories 5 à 7) aux outils de dynamique des systèmes, outils à base de graphes, réseau de pétri et courbes/arbres	93
Figure 33 : Données d'entrée (catégories 1 à 4) aux outils de dynamique des systèmes, outils à base de graphes, réseau de pétri et courbes/arbres	94
Figure 34 : Etapes de la méthodologie	101
Figure 35 : Granulométrie du TcAE	103
Figure 36 : catégories des ressources	104
Figure 37 : Activités essentielles d'un TcAE	104
Figure 38 : Représentation organique du TcAE	106
Figure 39 : Formalisme d'un EE/FE ou FA	110
Figure 40 : Illustration formalisme EE/FE ou FA	110
Figure 41 : Formalisme utilisateur.....	111
Figure 42: illustration d'une séquence fonctionnelle.....	112
Figure 43 : Représentation du TcAE.....	113
Figure 44 : Typologie des perturbations externes TcAE	115
Figure 45 : Origine des perturbations	115
Figure 46 : Séquence fonctionnelle avec une demande aval.....	117

Figure 47 : Illustration séquence fonctionnelle "fourniture eau potable " avec une demande aval	117
Figure 48 : Séquence fonctionnelle avec une demande amont.....	118
Figure 49 : Illustration séquence fonctionnelle "assainissement des eaux usées " avec une demande amont	118
Figure 50 : Branches des séquences fonctionnelles	118
Figure 51 : Paramètres des éléments essentiels et des fonctions essentielles ou d'association	120
Figure 52 : Intégrité, Disponibilité et Mobilité des individus du TcAE	121
Figure 53 : Carte présentation des zones de référence	122
Figure 54 : Evaluation de la résilience systémique	123
Figure 55 : Etapes détaillées de la démarche méthodologique.....	126
Figure 56 : Phases de construction du modèle TcAE	128
Figure 57 : Exemple de séquence fonctionnelle des composants d'une chaîne essentielle de fourniture d'eau potable	129
Figure 58 : Formalisme du couple élément essentiel/fonction essentielle	130
Figure 59 : exemple formalisme EE/FE	130
Figure 60 : Formalisme utilisateur et exemple	131
Figure 61 : Typologie causes et effets des défauts des EE, défaillances des FE ou FA et faiblesses des individus.....	132
Figure 62 : Matrice des liens.....	134
Figure 63 : Configuration des scénarios courts comportant des éléments essentiels	137
Figure 64 : Configuration des scénarios courts comportant des fonctions essentielles ou d'association	139
Figure 65 : Scénarios courts comportant les individus	140
Figure 66 : Règles de priorité/partage de service	142
Figure 67 : Algorithme de simulation des scénarios longs	144
Figure 68 : Acceptabilité des pertes de services.....	149
Figure 69 : Schéma récapitulatif de l'Etape A	152
Figure 70 : Schéma récapitulatif scénarios, Etape B	153
Figure 71 : schéma récapitulatif Etape C	154
Figure 72 : Cartes du TcAE pilote avec les zones de référence	155
Figure 73 : Cartes des éléments essentiels des CE1 et CE2.....	161
Figure 74 : Principaux éléments essentiels du pilote	165
Figure 75 : Séquence fonctionnelle 1 du TcAE Pilote	170
Figure 76 : Formalisme élément essentiel/fonction EE1/FE1	176
Figure 77 : Formalisme Utilisateurs (U) appliqué à U1	176

Figure 78 : Exemple des paramètres d'évaluation des scénarios courts comportant des éléments essentiels	179
Figure 79 : Exemple des paramètres d'évaluation des scénarios courts avec des fonctions essentielles ou d'association	179
Figure 80 : Illustration des paramètres des scénarios courts avec les utilisateurs et les personnes	180
Figure 81 : Extrait de la matrice des liens TcAE Pilote.....	181
Figure 82 : Illustration de la règle de priorité sortie S9 "Distribution eau potable"	182
Figure 83 : Illustration règle de partage de la sortie S31 « Transport du gazole du dépôt pétrolier »	182
Figure 84 : Extrait du scénario long 1	184
Figure 85 : Extrait des scénarios longs 2 (à gauche) et 3 (à droite)	186
Figure 86 : Cartes des pertes d'activité des éléments essentiels à t = 0	188
Figure 87 : Cartes des pertes d'activité des éléments essentiels à t = 2 heures	189
Figure 88 : Cartes des pertes d'activité des éléments essentiels à t = 6 heures	189
Figure 89 : Cartes des pertes d'activité des éléments essentiels à t = 48 heures	190
Figure 90 : Evolution temporelle des stocks S8 de la fonction d'association FA8 "Stocker eau potable"	191
Figure 91 : Formalisme multidimensionnel des données d'entrée et résultats appliqués aux méthodologies empirique	214
Figure 92 : Acteurs financiers et contrôle pour les services de l'eau (BIPE/FP2E, 2012)	225
Figure 93 : Cycle des services de l'eau potable et d'assainissement.....	226
Figure 94 : Eléments essentiels de l'activité essentielle de l'énergie.....	265
Figure 95 : Eléments essentiels de l'activité d'énergie (zone restreinte.....	266

Liste des tableaux

Tableau 1 : Caractéristiques des infrastructures critiques (d'après Bouchon, 2011)	49
Tableau 2: Critères de comparaison des méthodologies via trois états de l'art	55
Tableau 3 : Description des critères de comparaison des outils d'analyse des interdépendances entre IC utilisés par les méthodologies prédictives (d'après les travaux de Ouyang (2014) et Eusgeld <i>et al.</i> (2008))	58
Tableau 4 : Résultats de l'application des critères de comparaison aux cinq outils d'analyse des interdépendances entre IC (les travaux de Ouyang (2014) et Eusgeld <i>et al.</i> (2008))	59
Tableau 5 : Méthodologies des interdépendances entre IC étudiées	72
Tableau 6 : listes des chaînes essentielles	106
Tableau 7 : missions des chaînes essentielles du TcAE	108
Tableau 8 : Liste de verbes d'actions des fonctions	109
Tableau 9 : Identification des perturbations externes et des perturbations émises	131
Tableau 10 : Valeurs d'entrée des demandes des usagers	145
Tableau 11 : Valeurs des paramètres d'initialisation des scénarios courts	146
Tableau 12 : Alimentation électrique des postes source A/B/C	157
Tableau 13 : Liste des éléments essentiels composant CE1 et CE2	160
Tableau 14 : Paramètres de disponibilité et capacité maximale de service des éléments essentiels de CE1 et CE2	162
Tableau 15 : Liste des supports utilisés par les EE des CE1 et CE2 avec les paramètres de demande et de service	163
Tableau 16: Liste des éléments essentiels du TcAE Pilote	164
Tableau 17 : Liste des fonctions essentielles ou d'association formant SF1	166
Tableau 18 : Liste des sorties et mise en place de leurs paramètres de demande et de service	167
Tableau 19 : Liste des entrées utilisées par les FE ou FA de la SF1	167
Tableau 20 : Liste des contraintes utilisées par les FE ou FA de SF1	168
Tableau 21: Liste des fonctions essentielles ou d'association du TcAE Pilote	172
Tableau 22 : Individus actifs des éléments essentiels pour les zones de référence	173
Tableau 23 : Liste des ressources entrantes externes du TcAE	174
Tableau 24 : Liste des ressources externes sortantes et paramètres de demande et service	175
Tableau 25 : Liste partielle des scénarios courts du TcAE Pilote	178

Tableau 26 : Extrait de la liste des scénarios courts de SL1	185
Tableau 27 : Sous-catégories de données d'entrée des outils d'analyse des interdépendances	216
Tableau 28 : Sous-catégories de données d'entrée des outils d'analyse des interdépendances (suite)	217

Glossaire

Chaîne Essentielle (CE) : Ensemble d'éléments essentiels en interaction dynamique formant un système. Une chaîne essentielle a pour mission de fournir un service essentiel.

Élément essentiel (EE) : Composant d'une ou plusieurs chaînes essentielles. Les éléments essentiels sont eux-mêmes composés d'un ou plusieurs éléments. Il existe d'une part les éléments dits « nœuds » qui sont des « établissements », « une installation » ou un « ouvrage ». Les éléments dits « arcs » sont des « lignes », « canalisations », « conduites » ou « voies ». Les éléments essentiels utilisent des supports pour fonctionner.

Fonction Essentielle ou d'Association (FE ou FA) : Action ou opération que réalise un ou plusieurs éléments essentiels nœuds ou arcs. Un élément essentiel réalise une fonction essentielle. Plusieurs éléments essentiels réalisent une fonction d'association. Une fonction utilise des entrées et contraintes et délivre une sortie qui est un service.

Perturbation majeure : Evènement initial qui conduit la gouvernance du TcAE à organiser et coordonner la continuité d'activité et la remise en service en raison de la mise en péril des fonctions vitales. Cela se traduit de manière concrète par :

- Un évènement majeur endogène ou exogène au TcAE avec un potentiel de danger élevé ;
- Un ou plusieurs éléments essentiels de chaînes essentielles différentes et une ou plusieurs fonctions essentielles ou d'associations de séquences fonctionnelles différentes impactés directement et/ou indirectement ;
- Un nombre d'individus impactés élevé ;
- Une durée de l'évènement initial de plusieurs heures à plusieurs jours ;
- La nécessité de mutualiser des moyens matériels ou humains pour assurer la continuité d'activité et la remise en service. Les règles de priorités se substitueront aux règles économiques de marché.

Résilience Systémique : « La capacité d'un Territoire composé d'Activités Essentielles à résister aux impacts directs et indirects d'une perturbation majeure, puis à rétablir sa capacité de fonctionnement normal, ou à tout le moins dans un mode socialement acceptable ».

Territoire composé d'Activités Essentielles (TcAE) : « Espace géographique d'activités essentielles borné par des frontières administratives, constitué d'Éléments Essentiels et groupes d'individus interdépendants. Le TcAE dispose d'une gouvernance ayant des aptitudes en matière de gestion de crise et a pour finalité de garantir sa sécurité globale ».

Acronymes

AFIS : Association Française d'Ingénierie Système

ANR : Agence Nationale de la Recherche

ASN : Autorité de Sûreté Nucléaire

CE : Chaîne Essentielle

CIWIN : Critical Infrastructure Warning Information System

CGDD : Commissariat Général au Développement Durable

DICRIM : Document d'Information Communal sur les RISques Majeurs

DNS : Directive Nationale de Sécurité

DOS : Directeur des Opérations de Secours

EE : Élément essentiel

EPCIP : European Programme for Critical Infrastructure Protection

FE ou FA : Fonction Essentielle (FE) ou Fonction d'Association (FA)

HCFDC : Haut Comité Français de Défense Civique

IC : Infrastructure Critique

ICPE : Installation Classée pour la Protection de l'Environnement

INB : Installation Nucléaire de Base

INHES : Institut National des Hautes Etudes de Sécurité

ISO : Organisation Internationale de Normalisation

MEDDE : Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie

NAF : Nomenclature des Activités Françaises

OCDE : Organisation de Coopération et de Développement Economiques

ONU : Organisation des Nations Unies

ORSEC : Organisation de la Réponse en Sécurité Civile

OTAN : Organisation du Traité Atlantique Nord

PCA : Plan de Continuité d'Activités

PCS : Plan Communal de Sauvegarde

PIV : Point d'Importance Vital

PLU : Plan Local d'Urbanisme

PPE : Plan Particulier Externe

PPI : Plan Particulier d'Intervention

PPP : Plan Particulier de Protection

PPRI : Plan de Prévention des Risques Industriels

PPRN : Plan de Prévention des Risques Naturels

PSO : Plan de Sécurité Opérateur

REX : Retour d'EXpérience

SADT: Structured Analysis and Design Technique

SAIV : Secteur d'Activité d'Importance Vitale

SF : Séquence Fonctionnelle

SIG : Système d'Information Géographique

SMA : Systèmes multi-agents

SGDSN : Secrétariat Général de Défense et de Sécurité Nationale

TcAE : Territoire composé d'Activités Essentielles

TMD : Transport de Matières Dangereuses

UML : Unified Modeling Language

UNISDR : United Nations International Strategy for Disaster Reduction

ZDS : Zone de Défense et de Sécurité

Liste des paramètres

Paramètres concernant les fonctions essentielles ou d'association

- Capacité maximale de fourniture de sortie Si d'une fonction essentielle ou d'association FEu ou FAu : **Cmax(Si)**
- Coefficient de demande d'une entrée Ej ou sortie Si appartenant à une branche Bi d'une séquence fonctionnelle SFj : **CoefDemande(Bi, SFj)**
- Coefficient de conversion d'une entrée Ej ou sortie Si afin de traduire la demande des usagers en demande d'entrée Ej ou sortie Si: **CoefConversion(Ej ou Si, FEu ou FAu)**
- Demande en contrainte Cm d'une fonction essentielle ou d'association FEu ou FAu :
DemandeCm(Cm, FEu ou FAu, t) ;
- Service en contrainte Cm utilisé par une fonction essentielle ou d'association FEu ou FAu :
ServiceCm(Cm, FEu ou FAu, t) ;
- Réalisation de la fonction essentielle ou d'association FEu ou FAu suite à l'utilisation d'une contrainte Cm : **Ocf(Cm, FEu ou FAu, t) ;**
- Accomplissement de la fonction essentielle ou d'association FEu ou FAu suite à la valeur de perte d'activité de l'élément essentiel EEk :
AFonctionnelle(EEk, Supl ou h, FEu ou FAu, t) ;
- Demande en entrée Ej d'une fonction essentielle ou d'association FEu ou FAu :
DemandeEj(Ej, FEu ou FAu, t) ;
- Service en entrée Ej utilisé par une fonction essentielle ou d'association FEu ou FAu :
ServiceEj(Ej, FEu ou FAu, t) ;
- Opérabilité de la fonction essentielle ou d'association FEu ou FAu suite à l'utilisation d'une entrée Ej : **Op(Ej, FEu ou FAu, t) ;**
- Demande en sortie Si d'une fonction essentielle ou d'association FEu ou FAu :
DemandeSi(Si, FEu ou FAu, t)
- Valeur des stocks de Sortie Si d'une fonction essentielle ou d'association FEu ou FAu suivant :
 - o L'utilisation d'une entrée Ej par FEu ou FAu : **QStocksSi(Si, Ej, FEu ou FAu, t) ;**
 - o L'utilisation d'une contrainte Cm par FEu ou FAu :
QStocksSi(Si, Cm, FEu ou FAu, t) ;

- La perte d'activité de l'élément essentiel EE_k réalisant FE_u ou FA_u : **$QStocksSi(Si, Supl \text{ ou } h, EE_k, FE_u \text{ ou } FA_u, t)$** ;
- Valeur de Sortie Si d'une fonction essentielle ou d'association FE_u ou FA_u suivant :
 - L'utilisation d'une entrée E_j par FE_u ou FA_u : **$ServiceSi(Si, E_j, FE_u \text{ ou } FA_u, t)$** ;
 - L'utilisation d'une contrainte C_m par FE_u ou FA_u : **$ServiceSi(Si, C_m, FE_u \text{ ou } FA_u, t)$** ;
 - La perte d'activité de l'élément essentiel EE_k réalisant FE_u ou FA_u : **$ServiceSi(Si, Supl \text{ ou } h, EE_k, FE_u \text{ ou } FA_u, t)$** ;

Paramètres concernant les éléments essentiels

- Temps de remise en service maximal d'un élément essentiel EE_k : **$RemiseMax(EE_k)$** ;
- Rayon de danger d'une flux de danger k d'un élément essentiel EE_k : **$RayonDanger(k, EE_k)$** ;
- Seuil d'intégrité de l'élément essentiel EE_k qui déclenche un flux de danger pouvant impacter un autre élément essentiel : **$SeuilIntegrite(EE_k)$**
- Capacité maximale de service de l'élément essentiel EE_k : **$Cmax(EE_k)$** ;
- Coefficient d'impact fonctionnel de l'élément essentiel EE_k sur la fonction essentielle ou d'association FE_u ou FA_u qu'il réalise (desservant une sortie Si) : **$CoefImpactFonctionnel(EE, Si)$**
- Disponibilité d'un élément essentiel EE_k : **$Dispo(EE_k, t)$** ;
- Demande en support $Supl$ d'un élément essentiel EE_k : **$DemandeSupl(Supl, EE_k, t)$** ;
- Service en support $Supl$ utilisé par un élément essentiel EE_k : **$ServiceSupl(Supl, EE_k, t)$** ;
- Inaptitude d'un élément essentiel EE_k suite à l'utilisation d'un support $Supl$: **$ESupl(Supl, EE_k, t)$** ;
- Autonomie d'un élément essentiel EE_k en support $Supl$: **$TSupl(Supl, EE_k, t)$**
- Impact d'une perturbation h sur un élément essentiel EE_k : **$IMPh(h, EE_k)$** ;
- Durée de la remise en service d'un élément essentiel EE_k suite à une perturbation h : **$TRemise(h, EE_k)$**
- Intégrité de l'élément essentiel EE_k suite à une perturbation h : **$Ip(h, EE_k, t)$** ;
- Facteur de susceptibilité d'un élément essentiel EE_k de transmettre un flux de danger k suite à une perturbation h : **$Susceptibilite(h, k, EE_k, t)$** ;
- Pourcentage de perte d'activité d'un élément essentiel EE_k suite à une perturbation h ou à l'utilisation d'un support $Supl$: **$Epj(Supl \text{ ou } h, EE_k, t)$**

Paramètres concernant les individus

- Nombre d'individus Id dans une zone de référence ZRr : **IndividusTheoriques(Id) ;**
- Nombre de personnes Pj d'une zone d'impact ZIc : **NbreIndividusTheoriques(Pj) ;**
- Nombre d'utilisateurs Up dans une zone d'alimentation ZAp : **NbreUtilisateursTheoriquesUp(Up) ;**
- Facteur de forme entre une zone d'alimentation ZAp et une zone de référence ZRr : **Forme(ZAp,ZRr) ;**
- Facteur de forme entre une zone d'impact ZIc et une zone de référence ZRr : **Forme(ZIc,ZRr) ;**
- Impact d'une perturbation h sur les personnes Pj : **IMPh(h,Pj) ;**
- Durée de la perturbation h sur les personnes Pf : **TempsPerturbation(h,Pj) ;**
- Intégrité des personnes Pj suite à une perturbation : **Ip(h, Pj, t) ;**
- Service entrée Ej des utilisateurs Up : **ServiceEj(Ej, Up, t) ;**
- Le coefficient d'impact traduisant un nombre d'utilisateurs Up impacté par une perte d'entrée Ej en utilisateurs indisponibles ou immobiles, noté : **CoefImpact(Ej,Up)**
- Disponibilité ou Mobilité des utilisateurs Up : **Disponibilite(Ej, Up, t) ou Mobilite(Ej, Up, t);**
- Demande en sortie (=individus actifs d'un élément essentiel EEk) pour une zone de référence ZRr : **DemandeSi(Si,ZRr, t) ;**

Paramètres concernant les ressources externes du TcAE

- Service d'entrée Ej d'une ressource externe entrante du TcAE : **ServiceEj(Ej, EnvironnementTcAE, t) ;**
- Demande de sortie Si d'une ressource sortante de l'environnement du TcAE : **DemandeSi(Si, EnvironnementTcAE, t) ;**
- Service de sortie Si d'une ressource sortante de l'environnement du TcAE : **ServiceSi(Si, EnvironnementTcAE, t) ;**

Introduction

Plusieurs évènements survenus la décennie passée illustrent la gravité et l'étendue des impacts auxquels les territoires peuvent être confrontés. Les attaques terroristes de Madrid et Londres respectivement en 2004 et 2005, l'ouragan Katrina dans les régions de La Nouvelle-Orléans et de La Louisiane aux Etats-Unis en 2005, le blackout géant européen en 2006, la crise financière mondiale en 2008 sont des évènements certes très différents dans leur nature mais tous caractérisés par de multiples conséquences directes et indirectes de dimension sociale, économique, organisationnelle et environnementale. Afin d'illustrer ceci, les descriptions suivantes de trois retours d'expérience portent une attention particulière aux impacts indirects subis par les territoires et sociétés du fait qu'elles témoignent des dommages d'un évènement hors du lieu d'impact de celui-ci.

- Le premier évènement renvoie au détournement de quatre avions de ligne sur le territoire américain le mardi 11 septembre 2001. Deux de ces avions se sont écrasés sur les tours du World Trade Center à New-York et un autre sur le Pentagone à Washington. Le dernier avion a été retrouvé à Somerset Country. Ces attaques ont provoqué le décès de plus de 3000 personnes et des dégâts matériels très lourds notamment à New-York suite à l'effondrement des deux tours (Seifert, 2002; Bram *et al.*, 2002).
Dans le même temps, les lignes de télécommunications ont été endommagées ou saturées et l'espace aérien des Etats-Unis a été fermé pendant 24 heures (Seifert, 2002 ; Bram *et al.*, 2002) . A plus long terme, ces évènements ont engendré une hausse de 150% du budget américain de la Défense entre 2001 et 2011 (750 milliards de dollars en 2011) et une hausse de la sécurité dans les aéroports comme le montre le doublement de personnel (4200 personnes) dans ce service entre 2001 et 2004 aux aéroports de Paris (Hassid, 2011).
- La plus grande panne d'électricité d'Amérique du Nord a eu lieu le 14 août 2003. Cette panne a privé environ 50 millions d'utilisateurs sur plusieurs Etats Américains et sur la province de l'Ontario au Canada. Certaines zones des Etats-Unis n'ont pas été alimentées pendant plus de quatre jours. La situation dans toutes les zones touchées a été très perturbée pendant une dizaine de jours. Les coûts de ce « black-out » sont estimés entre 4 et 10 milliards de dollars aux EU et une baisse de 0.7% du produit intérieur brut pour le mois d'août pour la région de l'Ontario a été enregistrée. Cette panne a perturbé notamment le métro de New-York et les industries manufacturières des régions touchées (Groupe de travail Canada - Etats-Unis sur la panne de Courant, 2006).
- Au Japon, le 11 mars 2011, un séisme suivi par un tsunami puissant est un cas tristement retentissant. Le bilan humain et social est lourd : 28000 personnes sont mortes ou disparues et 100 000 personnes sont déplacées suite à la crise nucléaire intervenue sur la centrale de Fukushima Daïchi (HCFDC, 2012). Le coût du désastre est estimé à 208 milliards d'euros, soit environ 6% du PIB japonais (HCFDC, 2012). Bien qu'incertain, le montant pris en charge par les assurances

est estimé à 35 milliards de dollars (Schweisguth, 2011).

Par ailleurs, les secteurs d'activités de l'énergie, de la gestion de l'eau mais aussi plusieurs familles d'industrie comme la chimie, le bois, l'agroalimentaire sont touchées directement ou indirectement par ces deux aléas (MEDDE, 2013; Pitrat 2011). De nombreuses installations (Figure 1) sont détruites suite au tremblement de terre et tsunami sur le territoire de l'île de Honshu : 6 raffineries sur 28, 29 dépôts de carburants sur 190, 680 stations-service, 150 camions citerne, 19 stations de relevage d'eau potable sont partiellement ou totalement détruits (MEDDE, 2013).

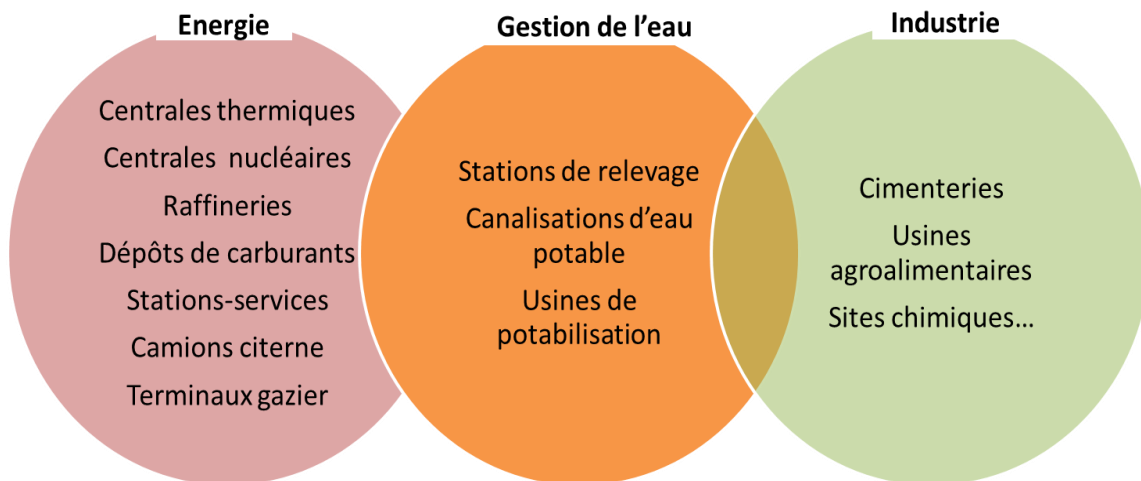


Figure 1 : Installations impactées directement par les séismes et tsunamis au Japon en Mars 2011 (d'après MEDDE, 2013)

D'autres entités du territoire japonais subissent également les impacts indirects de cette catastrophe dus à l'interruption partielle ou totale des circulations de matières, biens ou services (Figure 2). Par exemple, la diminution de la production d'électricité a entraîné un arrêt total ou partiel de plusieurs installations industrielles comme les cimenteries, les raffineries et encore les stations de pompage d'eau potable (MEDDE, 2013). Au final, 4 millions de personnes ont été privées d'électricité les 11 et 12 mars. Les opérations de délestage durant les mois suivants ont été subies par plus de 10 millions d'usagers japonais (MEDDE, 2013). 2,23 millions de foyers ont été privés d'eau potable les premiers jours après la catastrophe. Les stocks nationaux de réserve de produits pétroliers ont été sérieusement abaissés passant de 70 à 45 jours de consommation (MEDDE, 2013).

Dans le même temps, l'événement a eu une portée internationale. Les coupures des chaînes de production de grands groupes industriels ont été ressenties particulièrement en Asie et aux États-Unis. La place du Japon dans les secteurs de haute technologie (production de 73 % des systèmes de navigation pour les automobiles) a provoqué des ruptures d'approvisionnement dans les secteurs de l'électronique et l'automobile (Sampognaro *et al.*, 2012). La sortie du nucléaire de l'Allemagne programmée en 2022 et des nouvelles directives de sûreté pour les installations nucléaires par l'Autorité de Sûreté Nucléaire (ASN) en France sont d'autres exemples de répercussions intervenues dans le monde suite à cette tragédie (Aldrich, 2011).

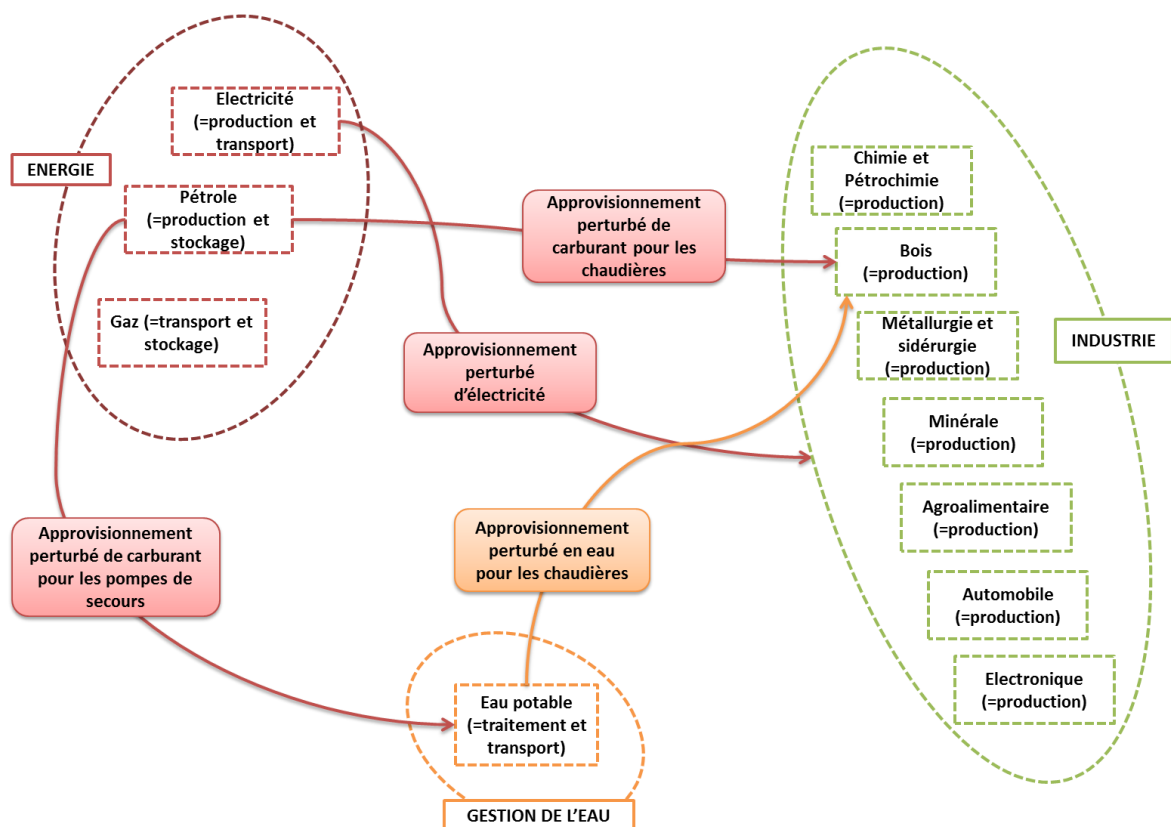


Figure 2 : Conséquences indirectes sur différents secteurs d'activité japonais suite au séisme et tsunami au Japon en Mars 2011 (d'après MEDDE, 2013)

Ces descriptions succinctes de ces trois retours d'expérience illustrent les propos tenus par Lagadec (2012) sur « les risques hors-cadre » ou « méga chocs ». Ces désastres montrent « une rupture » dans la gestion des risques car ils ont la particularité de désagréger les cartographies existantes. Ce changement intervient après celui rencontré dans les années 1960 et 1970 avec l'essor de la grande industrie (Lagadec, 2008). Cette époque marquait l'émergence du risque majeur qui désignait des risques spécifiques à un site industriel et son environnement. Pour y faire face, des mesures de sécurité locales suffisaient à maîtriser les vulnérabilités. Aujourd'hui, les conséquences ne sont pas ressenties uniquement à l'endroit où a lieu l'évènement initial mais sur une échelle spatiale étendue. Les trois retours d'expérience ont d'ailleurs montré des répercussions mondiales de ces évènements. Ces propos introduisent la notion d'impacts systémiques du fait des conséquences en chaîne de ces évènements (World Economic Forum 2014; Allianz Risk Pulse, 2014). L'OCDE (2003) évoque dans un rapport sur les risques émergents au XXIème siècle quatre forces qui influencent ces nouveaux risques systémiques : la démographie, l'environnement, les technologies et les structures socio-économiques. Ces forces illustrent les dépendances auxquelles sont confrontés les territoires. Par exemple, la force « technologies » illustre l'utilisation massive des réseaux pour permettre la circulation de biens, matières et services. Les décennies passées ont conduit à l'amélioration technique des réseaux en agrandissant leur taille et en les interconnectant. Néanmoins, ce changement a créé de nouvelles vulnérabilités (Michel-Kerjan, 2002). Lors d'une défaillance d'un des réseaux, une réaction en chaîne appelée « effet cascade » ou « effet domino » peut se produire et entraîner des conséquences à grande échelle.

Face à ces nouveaux risques, des nouvelles politiques de sécurité sont élaborées. A l'intérieur de ces politiques, une priorité est donnée aux Infrastructures dites Critiques (IC). Ces dernières fournissent des services vitaux pour les territoires aussi bien en période « de fonctionnement normal » que lorsque survient un évènement (Bouchon, 2011). Des stratégies de protection et de résilience sont alors mises en place pour faire face à des évènements dramatiques sur ces infrastructures critiques.

L'évolution des menaces et les nouvelles vulnérabilités entraînent les pays et organisations mondiales à adopter de nouvelles politiques de sécurité. En France, la publication en 2008 du livre blanc sur la défense et sécurité nationale fait suite à cette prise de conscience par les pouvoirs publics de l'instabilité et de l'incertitude du début du XXI siècle : « la typologie des menaces et des risques oblige à redéfinir les conditions de la sécurité nationale et internationale » (Mallet *et al.*, 2008) . Cette stratégie de sécurité nationale organise les réponses aux différentes crises à partir d'une analyse de risque (Présidence de la République - Commission du livre blanc sur la défense et la sécurité nationale, 2013). Elle s'inscrit dans une démarche de sécurité globale définie comme étant « la capacité d'assurer à une collectivité donnée et à ses membres un niveau suffisant de prévention et de protection contre les risques et les menaces de toutes natures et de tous impacts, d'où qu'ils viennent, dans des conditions qui favorisent le développement sans rupture dommageable de la vie et des activités collectives et individuelles » (Institut National des Hautes Études en Sécurité – INHES, 2003). La sécurité globale englobe plusieurs composantes de la sécurité comme par exemple la sécurité sanitaire, la sécurité économique, la sécurité civile ou encore la sécurité d'approvisionnement (Agence Nationale de la Recherche - ANR, 2013).

Afin de contribuer au renforcement de ces composantes de la sécurité globale, une priorité est portée sur le maintien des fonctions essentielles de la nation. Ces fonctions sont réalisées par les infrastructures dites critiques, essentielles ou vitales. Le terme infrastructure renvoie à des objets très différents : par exemple « un système », « un réseau », « une organisation » (Bouchon, 2011) qui ne relève pas d'une granularité propre. En raison de sa connotation « trop » génie civil, d'autres appellations existent (Robert, 2009 ; Coursaget 2011) . En substitution, les réseaux de support à la vie ou les activités d'importance vitale sont employés respectivement au Canada et en France. D'autre part, les infrastructures sont ainsi qualifiées de critiques en raison de l'importance qu'elles possèdent pour les sociétés en fonctionnement « normal » mais également lorsqu'une crise survient (Bouchon, 2011). C'est ainsi le cas pour les infrastructures d'énergie ou des télécommunications, les centres de décisions de maintien de l'ordre public ou d'organisation des secours sont des exemples d'infrastructures critiques.

Les états travaillent sur le recensement des infrastructures critiques pour faire face aux nouvelles menaces et aux conséquences potentielles en identifiant les infrastructures concernées et en hiérarchisant leurs vulnérabilités respectives. Il n'existe cependant pas de typologie d'infrastructures critiques notamment car les positions divergent lorsqu'il s'agit de définir ce qui faut protéger et contre quoi Galland (2010). Dans le but d'uniformiser la démarche d'identification des infrastructures critiques, Bouchon (2011) développe une méthodologie basée sur des critères de criticité territoriale. Ces travaux sont basés sur le postulat qu'un territoire contribue à la criticité des infrastructures critiques (IC) et que ces mêmes IC sont susceptibles d'aggraver la vulnérabilité des territoires.

Par ailleurs, les interdépendances entre les IC accentuent leur vulnérabilité (Rinaldi *et al.*, 2001). Le terme interdépendance est défini comme étant une dépendance mutuelle entre deux entités à la différence d'une dépendance qui exprime l'influence d'une entité

sur une autre (Rinaldi *et al.*, 2001). Elles se produisent à différents niveaux de granulométrie comme les niveaux des éléments constitutifs de certaines installations ou bien au niveau des secteurs d'infrastructures (Zimmerman, 2002). Quatre types d'interdépendances sont définis dans la littérature (Rinaldi *et al.*, 2001) :

- **Physique** : due à des échanges de ressources entre les infrastructures, du type relation client/fournisseur ;
Par exemple, les infrastructures de gaz naturel ont besoin d'électricité pour faire fonctionner les compresseurs. Les infrastructures d'électricité requièrent du gaz naturel pour produire de l'électricité par certaines centrales thermiques.
- **Géographique** : due à la proximité d'au moins deux infrastructures ;
Un site industriel et un poste de transformation électrique peuvent se trouver à proximité l'un de l'autre. Dans le cas d'une explosion sur le site industriel, le poste électrique peut être impacté et propager une défaillance sur la zone qu'il dessert.
- **Cybernétique** : due aux transferts d'informations entre deux infrastructures ;
Aujourd'hui, la quasi-totalité des infrastructures qui ont des interdépendances cybernétiques via les échanges d'informations sont concernées. Par exemple, les infrastructures de pilotage en charge de superviser les centrales de production ou les réseaux électriques.
- **Logique** : due à des réalités conjoncturelles, économiques, sociales, géopolitiques entre des infrastructures ;
Par exemple, les événements survenus au Japon en 2011 ont montré que les procédures de sûreté des centrales nucléaires françaises sont dépendantes des autres centrales nucléaires dans le monde.

Dans le cas des interdépendances physiques et cybernétiques, ce sont les réseaux d'infrastructures qui réalisent les interdépendances par les échanges de flux d'énergie, de matières, d'informations (Figure 3). Les infrastructures d'électricité influencent et dépendent des autres infrastructures du pétrole, de l'eau, du gaz naturel, du transport et des télécommunications. Ceci est également le cas pour les infrastructures des télécommunications.

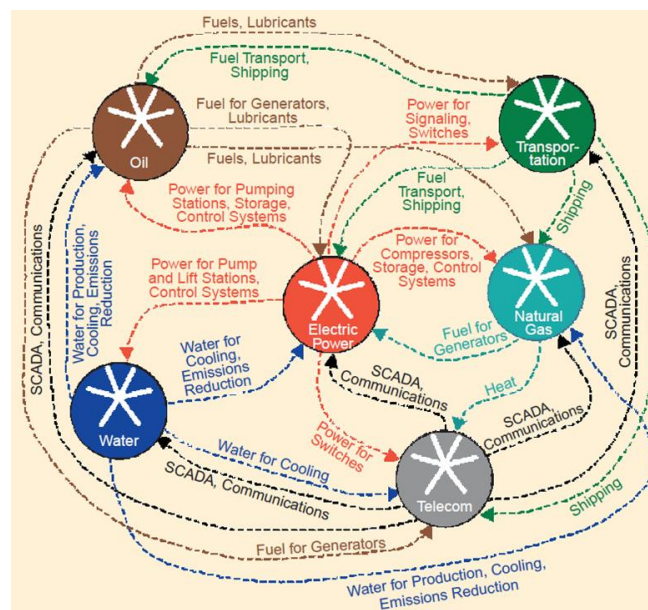


Figure 3 : Schéma des interdépendances entre les infrastructures critiques (Rinaldi *et al.*, 2001)

Suite à l'attentat d'Oklahoma en 1995, les Etats-Unis sont les premiers à traiter spécifiquement le cas des IC (Clinton, 1996). Après les attaques terroristes du 11 septembre 2001, puis les attentats de Madrid en 2004 et Londres en 2005, la protection des infrastructures critiques est devenue une priorité majeure des différents gouvernements ou organisations dans le monde. L'objectif de la protection des IC est d'empêcher leur dysfonctionnement, limiter les possibilités d'endommagement et augmenter leur niveau de résistance vis-à-vis de défaillances (Bouchon, 2011). Cette démarche vise essentiellement à assurer la sécurité d'approvisionnement des services essentiels comme l'électricité ou le gaz naturel (Bouchon, 2011). Des plans spécifiques de protection des IC ont alors été mis en place et ont déjà fait l'objet de plusieurs révisions. Trois zones se démarquent principalement dans le monde : l'Australie, l'Amérique du Nord et l'Europe (Petit *et al.*, 2010). Ces plans abordent la protection des IC selon (Porod *et al.*, 2012) :

- le choix d'une approche stratégique (exemple : OTAN) ou opérationnelle (exemple : Région du Québec) ;
- les échelles d'application : locale, régionale, nationale ou internationale ;
- les types d'interdépendances : physiques, géographiques, cybernétiques ou logique ;
- les menaces : catastrophe naturelle, accident technologique, acte intentionnel (malveillance ou terrorisme) ;
- la prise en compte de mesures de protection et de résilience.

Les deux dernières caractéristiques soulignent l'évolution des plans vers une approche multirisques et du passage d'une politique de protection des IC à une politique de protection et résilience des IC. Cette évolution s'explique par les observations effectuées des événements passés comme l'ouragan Katrina en 2005 (Yaeger *et al.*, 2012). D'une part, ils ont montré que les actes intentionnels n'étaient pas le seul type d'évènement à pouvoir impacter les IC et d'autre part qu'il est difficile voire impossible de protéger toutes les infrastructures des différents événements potentiels.

En Europe, l'EPCIP (European Programme for Critical Infrastructure Protection) adopté en 2006 vise à établir les aspects stratégiques et le développement de mesures concernant la PIC, analyser les infrastructures critiques européennes mais aussi aider et émettre des recommandations aux pays membres sur leurs infrastructures critiques nationales. En parallèle, le CIWIN (Critical Infrastructure Warning Information System) est créé afin d'améliorer les échanges en cas d'alerte. Les différentes communications européennes (European Commission 2006; European Commission, 2004) et l'adoption de l'EPCIP ont conduit à l'adoption de la Directive 2008/114/EC en décembre 2008 offrant un cadre législatif à la protection des infrastructures critiques européennes (Conseil Européen, 2008). Cette directive couvre deux secteurs d'activités : l'Energie et les Transports. Cette démarche est jugée satisfaisante par de nombreux experts afin d'améliorer la connaissance des infrastructures critiques européennes et est destinée à être poursuivie (Parlement Européen *et al.*, 2013).

En ce qui concerne le cas Français, la sécurité des activités d'importance vitale est présentée comme un élément de renforcement de résilience de la Nation sur le territoire national (Mallet *et al.*, 2008). Ce dispositif réglementaire et législatif inséré dans le code de la défense est un outil associant les opérateurs d'infrastructures critiques et les pouvoirs publics aux menaces intentionnelles. Il s'agit notamment de mettre en place et d'appliquer des mesures de vigilance, prévention et protection, inscrites dans la planification gouvernementale VIGIPIRATE. Dans le cas français, les secteurs d'infrastructures critiques appelés Secteurs d'Activités d'Importance Vitale (SAIV) sont définis comme « les activités concourant à un même objectif, qui :

- Ont trait à la production et la distribution de biens ou de services indispensables
 - A la satisfaction des besoins essentiels pour la vie des populations ;
 - Ou à l'exercice de l'autorité de l'Etat ;
 - Ou au fonctionnement de l'économie ;
 - Ou au maintien du potentiel de défense ;
 - Ou à la sécurité de la Nation, dès lors que ces activités sont difficilement substituables ou remplaçables ;
- Ou peuvent présenter un danger grave pour la population. » (Article R.1332-2 Du Code de La Défense)

La définition des SAIV introduit le débat existant sur la prise en compte des sites industriels comportant des substances dangereuses comme étant des infrastructures critiques ou non (industrie chimique ou nucléaire). Cela revient à dire qu'une infrastructure peut être également critique du fait des conséquences qu'elle peut engendrer sur la santé ou la vie des populations. La majorité des pays ou organisations n'ont pas retenu cette approche. Cela s'explique par les réglementations existantes en sécurité industrielle (directives SEVESO et EURATOM en Europe). Néanmoins, la France dispose d'IC qui sont à la fois soumises au dispositif des SAIV et des directives SEVESO ou EURATOM renforçant ainsi leur sécurité globale. Aujourd'hui, douze secteurs sont répartis en trois catégories : secteurs étatiques, secteurs de la protection des citoyens et les secteurs de la vie économique et sociale de la nation (Figure 4). Mille cinq-cents Points d'Importance Vitale (PIV) ou infrastructures critiques sont recensés dans le pays (Coursaget, 2011) et ont chacun l'obligation d'élaborer et rédiger un Plan Particulier de Protection (PPP) et un Plan de Continuité d'Activités (PCA) (SGDSN, 2014).



Figure 4 : Liste des Secteurs d'Activités d'Importance Vitale (SAIV)

Les résultats aujourd'hui de l'efficacité des plans stratégiques et opérationnels sur les infrastructures critiques sont peu connus (Bouchon, 2011). Cependant, à partir des retours d'expériences d'événements récents, certains enseignements peuvent être dégagés. L'ouragan Sandy qui a frappé la côte Est des Etats-Unis a montré un bilan positif de la gestion de crise (HCFDC, 2013). Cet événement illustre également les actions mises en place dans les différentes phases de gestion d'un tel événement (HCFDC, 2013) :

- la préparation ou anticipation, exemple : fermeture du métro à New-York vingt-quatre heures avant l'évènement
- le rétablissement partiel, exemple : installation de groupes électrogènes et alimentation en carburants pour le fonctionnement des antennes de communication interrompues à plus de 80 % entre deux et cinq jours ;
- le rétablissement total, exemple : réparation des lignes électriques avec des renforts ;

Néanmoins, malgré les mesures de protection et résilience mises en place sur les IC des

problèmes demeurent. Des améliorations restent à accomplir concernant la localisation d'entités en zone inondable ou peu résistantes à des événements violents et sur la maîtrise de la chaîne d'approvisionnement du pétrole (HCFDC, 2013). Dans le même temps, une crue majeure de la Seine à Paris est un événement grave redouté par les autorités françaises. Un récent rapport de l'OCDE (2014) commente une liste de dommages potentiels sur les IC : 1,5 millions d'utilisateurs privés d'électricité, 140 kilomètres de lignes de métro fermés préventivement, 5 millions d'abonnés pourraient subir des coupures d'eau prolongées et 1,3 million une dégradation de sa qualité. Les coûts des dommages directs sont estimés entre 3 et 30 milliards d'euros.

En France, face à cette possibilité de crue majeure et à d'autres événements susceptibles de se produire, les opérateurs d'IC sont conscients des enjeux mais la préparation reste encore insuffisante (HCFDC, 2013). Il existe peu d'outils opérationnels pendant la crise comme des cartes de priorités et les interdépendances ne font pas l'objet d'une planification propre (HCFDC, 2013). Il existe toutefois au niveau départemental et zonal, des dispositions du plan ORSEC (Organisation de Réponse en Sécurité Civile) portant sur l'obligation des exploitants de réseaux d'assurer la satisfaction des besoins prioritaires (électricité, gaz, eau potable, assainissement, communications électroniques). Les exploitants mettent en œuvre des moyens nécessaires en vue du rétablissement des réseaux dans les meilleurs délais et appliquent les consignes du préfet en cas de décision de rétablissement prioritaire de certains secteurs ou clients vis-à-vis d'autres (Les services de l'État dans le département des Yvelines, 2014). Pour cela un guide ORSEC départemental et zonal pour le rétablissement et l'approvisionnement d'urgence des réseaux à destination des préfets dresse une liste de réseaux prioritaires et dont le rétablissement est prioritaire par rapport à celui d'autres réseaux (ou conditionne celui des autres) (MEDDE, 2013).

La protection et la résilience des infrastructures critiques sont devenues des priorités des politiques mises en œuvre par les pays ou les organisations (développement de plans de sécurité). En France, des mesures intrinsèques de protection et de résilience sont déployées sur chaque infrastructure critique identifiée à l'échelle nationale. Les opérateurs de réseaux ont également des obligations de continuité d'activité par l'intermédiaire des dispositions du plan ORSEC.

Néanmoins, les interdépendances accentuent la fragilité de ces IC et sont peu prises en compte dans les mesures de planification (HCFDC, 2013). On peut noter que l'influence de la population et de la gouvernance des territoires ne semble également pas assez prise en compte en période de crise. Ainsi, les réponses apportées par ce travail ont pour but de réduire ces lacunes en mettant en place une nouvelle démarche méthodologique.

La gestion de crise sur le sol français demeure l'affaire du Maire au niveau communal, du Préfet de département ou de zone au niveau départemental ou zonal et d'un Ministre ou du premier Ministre au niveau national. Par ailleurs, pour Bouchon (2011) les caractéristiques du territoire contribuent à la criticité des infrastructures et réciproquement ces dernières sont susceptibles d'aggraver la vulnérabilité du territoire. Il existe donc des infrastructures critiques au niveau communal, départemental, zonal et national. En cas de dysfonctionnement d'une d'entre elles, une situation de crise pourrait survenir du fait des interdépendances entre les IC mais aussi à cause des interactions entre ces IC et la population du territoire. Évaluer les impacts directs et indirects sur le territoire d'un événement majeur à partir de la modélisation et simulation du comportement des infrastructures critiques et de la population est alors un apport de connaissances indispensables pour la gouvernance du territoire. En effet, ces informations aident les décideurs du territoire et les opérateurs d'IC dans leur préparation à la gestion de crise en

planifiant des mesures de rétablissement partiel ou de remise en service des IC (exemple : installation de groupes électrogènes en cas d'interruption électrique) mais aussi en anticipant des mesures de substitution pour répondre aux besoins des usagers (exemple : camion-citerne d'eau potable en cas d'interruption de la distribution d'eau potable). Elles peuvent également conduire à mener des actions de traitement du risque sur certaines infrastructures critiques identifiées comme étant fréquemment impactées dans les simulations. Par ailleurs, cet apport de connaissances nécessite préalablement l'acquisition de données souvent peu accessibles. Tout en portant une attention particulière à cette difficulté dans la réalisation de ce travail, nous avons admis que ces informations pouvaient être récoltées en privilégiant davantage un apport théorique.

Les propos précédents conduisent à formuler une problématique de recherche sur les infrastructures critiques de la façon suivante :

Comment décrire un territoire sous le prisme des activités et infrastructures essentielles qui participent à son bon fonctionnement ?

Comment modéliser ces infrastructures et les interactions qui les relient entre elles et aux individus ?

Comment évaluer les impacts d'une perturbation majeure sur ce territoire ?

Comment identifier une stratégie de résilience d'un territoire composé d'activités essentielles ?

Les résultats principalement conceptuels mais également opérationnels apportés par ce travail sont à destination des gouvernances des territoires et des opérateurs d'activités essentielles désireux de renforcer la résilience des territoires face à une perturbation majeure venant déstabiliser les activités essentielles qui le constituent. Pour cela, le manuscrit est articulé en deux parties composées respectivement de deux et trois chapitres. Une discussion générale et conclusion terminent ce document.

Le premier chapitre pose le socle sémantique qui contribue à définir l'objet de l'étude. Les notions de territoire, d'organisation du territoire face aux risques, d'infrastructures critiques sont discutées et conduisent à considérer le territoire comme un système complexe.

Le deuxième chapitre s'appuie sur un état de l'art des méthodologies d'analyse et de modélisation des infrastructures critiques interdépendantes. Un cadre d'analyse de ces travaux méthodologiques s'intéressant aux outils de modélisation, aux secteurs d'activités et échelle territoriale concernés, aux dimensions (technique, économique, sociale, institutionnelle, spatiale) prises en compte ainsi qu'au formalisme de modélisation retenu est proposé. Il permet d'engager une réflexion sur les approches existantes et constitue un apport de connaissances essentiel pour structurer la démarche méthodologique d'étude de l'évaluation des impacts directs et indirects d'une perturbation majeure sur un Territoire composé d'Activités Essentielles (TcAE) (Figure 5).

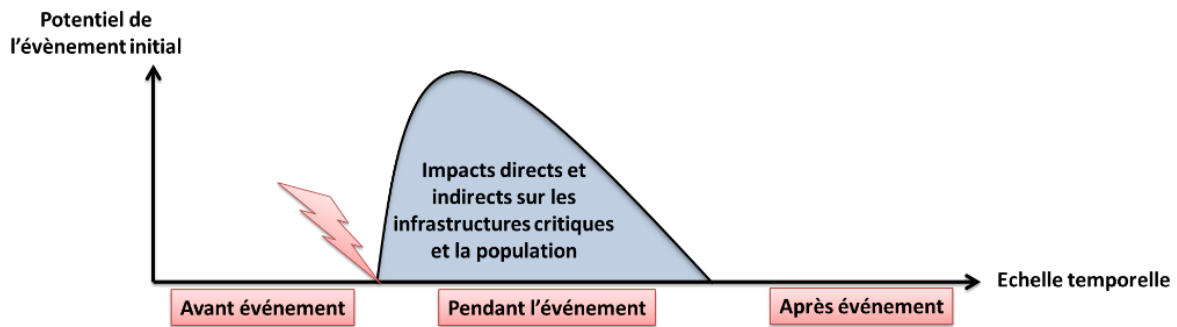


Figure 5 : Impacts fonctionnels directs et indirects d'un événement dans le temps

Les principaux concepts de cette approche sont définis dans le chapitre 3 de ce manuscrit avant de développer la démarche méthodologique au sein du chapitre 4. La méthodologie se base sur une vision élargie des infrastructures critiques basée notamment sur l'approche de Bouchon et conduit à envisager la problématique de la modélisation des infrastructures critiques à partir des approches systémique et spatiale. Cela permet de proposer un modèle tenant compte des aspects multi-échelles du territoire, de la composante intersectorielle et multifonctionnelle des IC ainsi que la prise en compte de l'environnement des infrastructures critiques. Ceci constitue clairement une modélisation originale d'un territoire composé d'Activités Essentielles et permet d'envisager l'évaluation de la résilience systémique de ce système complexe.

Le cinquième chapitre est consacré à l'application de la démarche méthodologique sur un territoire pilote, à l'échelle départementale.

Enfin, la mise en œuvre de la démarche à un territoire, permet de formuler une analyse critique de la méthodologie et d'en extraire dans un premier temps les apports mais aussi les limites. Ce regard critique conduit à énoncer des perspectives à ce travail de recherche et de conclure sur l'aide à l'amélioration de la résilience des activités essentielles et de la population d'un territoire.

Partie I : Apports de connaissances pour la construction d'une méthodologie d'analyse d'un territoire composé d'activités essentielles

Cette première partie se décompose en deux chapitres. Le premier chapitre se consacre à étudier le territoire et les infrastructures critiques dans un contexte de gestion des risques et des crises. Pour cela, les notions de territoire et de risque sont développées. Les différentes phases de gestion des risques et des crises d'un territoire sont également abordées. L'approche systémique est alors présentée afin d'appréhender le territoire et son organisation dans les phases de gestion des risques et des crises. Un des composants du système complexe territoire est les infrastructures critiques. Les caractéristiques de ces infrastructures critiques sont alors exposées. Le dernier paragraphe de ce chapitre dégage les principales orientations des travaux méthodologiques portant sur la gestion des risques et des crises des interdépendances entre les infrastructures critiques. Une revue de la littérature est alors présentée dans le second chapitre. A partir d'un cadre d'analyse commun, trente-six méthodologies sont analysées. Les principales données d'entrée et les résultats sont identifiés à partir du contexte multidimensionnel de ces informations (technique, institutionnelle, économique, spatiale, sociale).

I-1. Le territoire et les infrastructures critiques dans un contexte de gestion des risques et des crises

La notion de territoire et sa gestion des risques et des crises à différentes échelles territoriales sont abordées dans un premier temps. Ces informations amènent à présenter le territoire comme un système complexe. Les infrastructures critiques sont un composant du système territoire pouvant être analysées ensuite par deux approches complémentaires qui sont l'approche systémique et l'approche spatiale. Enfin, après avoir identifié les travaux méthodologiques relatifs aux interdépendances entre infrastructures critiques, les principaux outils d'analyse des interdépendances sont comparés.

I-1.1. Notion de territoire

Cette partie aborde la notion de territoire à partir de ses définitions et de ses caractéristiques.

La notion de territoire est polysémique (Elissalde, 2005), des disciplines aussi diverses que la géographie, l'écologie, les sciences politiques ou encore l'économie y faisant fréquemment référence. Autès (1995) souligne que le territoire possède deux faces : d'un côté, l'espace géographique et l'humain et de l'autre côté, le découpage administratif et territoire politique inclus dans des frontières.

Le second cas considère le territoire comme un moyen aux services de finalités tandis que le premier étudie le territoire par les rapports existants entre l'activité humaine et l'espace se rapprochant ainsi des définitions données en géographie ou écologie :

- Montaron (2012): « une zone d'habitat occupée par un individu ou une population (au sein d'un peuplement) d'une espèce végétale ou plus généralement animale ».
- Di Méo (1998) : « ensemble de relations entre une population et un espace » ;
- Le Berre (1992) : « la portion de la surface terrestre, appropriée par un groupe social pour assurer sa reproduction et la satisfaction de ses besoins vitaux » ;

Ces acceptions considèrent que les rapports sur le territoire ne se focalisent pas uniquement sur les humains mais davantage sur une population ou des acteurs. D'autre part, la définition de Le Berre (1992) sous-entend une finalité se rapprochant alors des définitions données au territoire en sciences politiques. Le territoire est un « espace géographique borné par des frontières, abritant une population, soumis à une autorité politique qui lui est propre et considéré en droit comme un élément constitutif de l'État et comme limite de compétence des gouvernants » (Beck, 2006).

Ces définitions permettent d'identifier trois caractéristiques d'un territoire : l'espace géographique avec ses limites ou frontières, la population et les finalités.

La première caractéristique est évidente du fait que la notion de territoire a remplacé la notion d'espace géographique intervenant suite à une demande davantage sociale (Marconis, 2014). Cette notion de territoire est apparue pour convenir à des disciplines autres que la géographie comme les sciences, la sociologie et encore la politique. Ces notions sont proches comme le montre la définition de Brunet *et al* (1993) qui détermine l'espace géographique comme « l'étendue terrestre utilisée et aménagée par les sociétés en vue de leur reproduction, non seulement pour se nourrir et s'abriter, mais dans toute la complexité des actes sociaux ». D'autre part, l'espace géographique sous-entend une

indifférence scalaire engendrant l'absence d'échelle propre au territoire (Elissalde, 2005) et des limites ou frontières. Reitel (2004) distingue deux définitions de frontières : les frontières culturelles ou sociales par exemple via la linguistique ou la religion, et les frontières politiques ou géographiques signalant la séparation entre deux territoires. Ces frontières sont souvent administratives (Moine, 2005) facilitant les décisions des gouvernants des territoires mais s'éloignant des éléments environnementaux (Brilhac *et al.*, 2009).

Un territoire est également caractérisé par sa population définie comme un « groupe social », des « individus » ou des « acteurs ». Elle n'est d'ailleurs pas nécessairement humaine, mais elle participe à la construction du territoire et lui procure une identité (Elissalde, 2005 ; Muis, 2014). Par exemple, l'homme protège, défend, valorise et aménage son territoire dans le temps (Muis, 2014).

Les finalités potentielles du territoire caractérisent son aspect fonctionnel. Muis (2014) définit le territoire comme un objet que l'on peut monnayer, posséder et administrer à différents échelons. Le territoire peut alors être un lieu de fonctions d'administration et de gouvernance ou de manière plus basique de reproduction et satisfaction des besoins vitaux (Leberre, 1992). Muis (2014) souligne que le territoire se dote d'une configuration ou organisation spécifique pour réaliser ces fonctions.

Un territoire est un espace géographique possédant des frontières ou limites en interactions avec sa population. Ces derniers construisent une identité au territoire dans le temps. L'utilisation pluridisciplinaire de la notion de territoire a mis en avant son aspect fonctionnel. C'est par exemple le cas des actions d'aménagement du territoire qui désignent « l'action publique s'efforçant de répartir géographiquement la population et les activités économiques, soit pour homogénéiser le territoire, soit pour accélérer ou réguler le développement, soit pour améliorer les positions du pays dans le jeu des concurrences internationales » (Gambino, 2010). C'est également le cas des actions de gestion des risques et des crises qui favorisent une nouvelle organisation du territoire et son maintien dans un état d'équilibre acceptable pour la société.

I-1.2. La gestion des risques et des crises sur le territoire

L'espace géographique et les acteurs sont des caractéristiques du territoire et constituent des enjeux mais aussi des sources de dangers potentiels. La France est dotée d'une organisation afin de gérer les risques et les crises sur ses territoires. Cette organisation forme un processus itératif d'amélioration continue structurée en plusieurs phases (d'après COFELY INEO *et al.*, 2013) : la connaissance de l'aléa et la vulnérabilité, l'obligation à l'information, la prévention des risques, la planification et l'organisation des secours et la gestion de crise. Avant d'aborder la politique de gestion des risques et des crises sur le territoire français, les définitions retenues pour les mots risque, vulnérabilité, résilience et crise sont présentées.

Cette partie se focalisera uniquement sur les risques naturels, sanitaires, technologiques ainsi que sur les risques liés à des événements intentionnels (acte de malveillance ou terrorisme).

I-1.2.1 Terminologie générale du risque

i. Risque

Le risque est défini comme « la combinaison de la probabilité d'un événement et de sa conséquence » par la norme ISO 73. Une variante détermine le risque comme l'association d'un aléa et d'enjeux (MEDDE, 2013). L'aléa est alors caractérisé par une probabilité d'occurrence et une intensité. La vulnérabilité s'étudie à partir des enjeux, par exemple les enjeux humains ou économiques, pouvant être potentiellement impactés par l'événement. La notion de risque est également approfondie à partir des types d'événements. Ces derniers font ressortir le risque majeur et le risque encouru.

Le risque majeur concerne les risques à faible fréquence et forte gravité défini comme la « possibilité d'un événement d'origine naturelle ou humaine, dont les effets peuvent toucher un grand nombre de personnes, puisse occasionner des dommages importants et dépasser les capacités de réaction de la société » (COFELY INEO *et al.*, 2013). Sur le territoire français, neuf risques liés à des événements naturels (l'inondation, le séisme, l'éruption volcanique, le mouvement de terrain, l'avalanche, le feu de forêt, le tsunami, le cyclone et la tempête), quatre risques liés à des événements technologiques d'origine anthropique (accident nucléaire ou industriel, transport de matières dangereuses, rupture de barrage) et trois risques liés à des événements sanitaires (canicule, pandémie et l'épizootie) caractérisent le risque majeur (COFELY INEO *et al.*, 2013). La notion de risque encouru couvre les événements de type malveillant ou terroriste. Le risque encouru est défini comme étant « l'appréciation combinée de la vraisemblance d'une agression réussie et de ses impacts » (SGDSN, 2014). Dans ce cas, l'aléa ou l'événement est distingué par la notion de menace. Ce terme considère essentiellement les événements intentionnels mais peut toutefois être utilisé pour les autres types d'événements comme le montre la définition proposée par le (SGDSN, 2014) : « tout événement physique, phénomène ou activité humaine potentiellement préjudiciable, susceptible de provoquer des décès ou des lésions corporelles, des dégâts matériels ou immatériels, des perturbations sociales et économiques ou une détérioration de l'environnement ».

La politique de gestion des risques du territoire porte à la fois sur l'étude des différents types d'évènements qu'il subit mais aussi sur les enjeux impactés. Historiquement, la gestion des risques s'est focalisée sur l'aléa (Veyret *et al.*, 2006). Les solutions techniques se sont alors centrées sur la réduction de sa fréquence et son intensité afin de diminuer les impacts ou dommages. La prise en compte des enjeux ont fait émerger des politiques de réduction de la vulnérabilité et d'amélioration de la résilience (Lhomme *et al.*, 2010).

ii. Termes polysémiques de la vulnérabilité et résilience

La notion de vulnérabilité est polysémique. Deux grandes tendances s'affichent (Reghezza, 2005; Leone *et al.*, 2005). D'une part, la vulnérabilité mesure l'endommagement potentiel des éléments exposés. D'autre part, la vulnérabilité détermine la sensibilité ou la propension à l'endommagement et par extension, la capacité de réponse de l'enjeu. La définition donnée par le MEDDE (2013) agrège ces points de vue : « la vulnérabilité peut-tout d'abord être vue comme étant le taux d'endommagement attendu d'un équipement donné (bâtiment, activité, société,...). Elle peut également être vue comme étant l'ensemble des facteurs de fragilité qui contribuent à la réalisation des dommages en cas de survenue de l'aléa ». Dans le cas des actes intentionnels, la vulnérabilité prend le second sens comme le montre la définition donnée par le (SGDSN, 2014) : « propension d'un milieu, d'un bien ou d'une personne à subir des conséquences dommageables à la suite d'un événement ». La vulnérabilité est davantage vue comme identifiant les points faibles des enjeux par rapport à un événement donné (SGDSN, 2014).

Un concept complémentaire de la notion de vulnérabilité est celui de résilience. A l'origine appliqué dans le domaine des matériaux (Lhomme *et al.*, 2010), le concept de résilience est devenu diversifié et polysémique après son transfert aux sciences sociales, la psychologie, l'économie et encore l'écologie (Dauphiné *et al.*, 2007). Provenant du mot latin *Résilio* signifiant rebondir, la notion de résilience exprime le fait de sauter en arrière ou rebondir (Gaffiot cité dans Lhomme *et al.*, 2010). Au départ, la notion est employée dans le domaine des matériaux et en écologie afin de déterminer la capacité d'un système à revenir à un état initial ou un état d'équilibre (Lhomme *et al.*, 2010). Puis la prise en main de la notion de résilience dans le domaine des sciences sociales (groupe de chercheurs « résilience alliance ») a fait disparaître la notion de retour en arrière pour associer la résilience à la capacité d'adaptation du système (Lhomme *et al.*, 2010).

Provitolo (2012, cité dans CGDD, 2014) identifie deux écoles. D'une part, la résilience est vue comme la capacité à retrouver un nouvel état d'équilibre après une perturbation, parfois le même état qu'avant la rupture et d'autre part la résilience comme la capacité d'un système à se renouveler, à se réorganiser, à trouver de nouvelles trajectoires pour mieux prévenir une éventuelle catastrophe. Ces définitions ne s'opposent pas mais se complètent (CGDD, 2014). Le Secrétariat Général de Défense et de Sécurité Nationale (2014) définit la résilience comme étant « la volonté et la capacité d'un pays, de la société ou des pouvoirs publics à résister aux conséquences d'une agression ou d'une catastrophe majeure, puis à rétablir rapidement leur capacité de fonctionner normalement, ou à tout le moins dans un mode socialement acceptable ».

Le passage de la vulnérabilité à la résilience ou inversement n'est pas formalisé du fait des différentes définitions. La vulnérabilité peut contenir la résilience ou réciproquement, mais les deux notions peuvent aussi se recouvrir partiellement. La mise en place de ces concepts dans la gestion des risques apparaît être une différence de point de vue centré sur les notions d'endommagement pour la vulnérabilité et les notions de récupération fonctionnelle et rétablissement pour la résilience (Lhomme *et al.*, 2010).

iii. Facteurs de vulnérabilité et capacités de résilience

Les concepts de vulnérabilité et de résilience peuvent être appliqués à différents systèmes comme un site industriel, une organisation, un pays, une ville ou un territoire. A ce titre, (Laganier, 2013) souligne que la ville devient le terrain privilégié pour la mise en œuvre du concept de résilience. L'identification des facteurs de vulnérabilité et des capacités de résilience souligne la prise en compte des interactions entre les enjeux des villes et des territoires ainsi que l'appréhension des dimensions spatiales et temporelles.

(Rufat, 2007) propose d'étudier la vulnérabilité selon trois facteurs que sont les facteurs individuels comme la densité ou mobilité des populations, les facteurs physiques comme l'habitat collectif ou les établissements recevant du public et les facteurs sociétaux comme la répartition de la population ou la réaction en cas de crise. Cette analyse n'intègre pas explicitement le facteur systémique ou de dépendance qui permet de prendre en compte les interactions entre les éléments du territoire et associe le fait que la vulnérabilité d'un territoire n'est pas réductible à la somme des vulnérabilités des différents enjeux. Ce facteur de dépendance ou systémique permet alors d'aborder le problème de la vulnérabilité de manière holistique (Leone and Vinet, 2005). Dans le cas de la vulnérabilité urbaine, Guézo *et al.* (2006) détermine cinq facteurs : structurel, géographique, organisationnel, individuel et de dépendance. Ce facteur de dépendance traduit la fragilité de la ville aux interactions entre son espace, ses usagers et ses activités internes. D'Ercole *et al.*, (2009) détermine quant à lui, six facteurs de vulnérabilité des enjeux : les caractéristiques intrinsèques, l'exposition de l'enjeu aux aléas et sa susceptibilité d'endommagement, la dépendance, la capacité de contrôle, les alternatives de fonctionnement et le niveau de préparation de gestion des crises. La dimension spatiale influence alors les facteurs d'exposition de l'enjeu aux aléas et la capacité de contrôle qui inclut l'accessibilité des enjeux.

La résilience peut être étudiée pendant les trois phases temporelles d'un événement : on parle de résilience proactive avant, de résilience réactive pendant, et de résilience post active après (UNISDR, 2012). La résilience réactive englobe les capacités de résistance/d'absorption, d'auto-organisation ou de réponse collective lors d'une crise. La résilience proactive et post active intègre les capacités d'adaptation et d'apprentissage (UNISDR, 2012). Ces capacités mettent en avant la dimension temporelle de la résilience urbaine établie comme étant de temps court (pendant l'évènement) et de temps long (avant et après évènement) (Figure 6).

Deux leviers existent pour améliorer la résilience urbaine de temps court :

- La mise en place d'une stratégie technique visant à limiter le degré de perturbation du système par une meilleure capacité de résistance et d'absorption (Serre *et al.*, 2012);
- La mise en place d'une stratégie organisationnelle visant à accélérer le retour à la normale par une gestion optimisée des moyens et des ressources, et une bonne accessibilité (Toubin *et al.*, 2012);

La résilience de temps long consiste à procéder à une démarche d'amélioration continue « qui vise à augmenter la résilience de temps court en mettant à profit les capacités d'apprentissage et d'adaptation [...] » (Toubin *et al.*, 2012). Dans le cadre de son opérationnalisation, la résilience de temps court porte sur les composants de la ville à réagir face à un événement alors que la résilience de temps long se place au niveau de la ville afin de mieux la préparer à maintenir ses fonctions face à un événement (Toubin *et al.*, 2012).

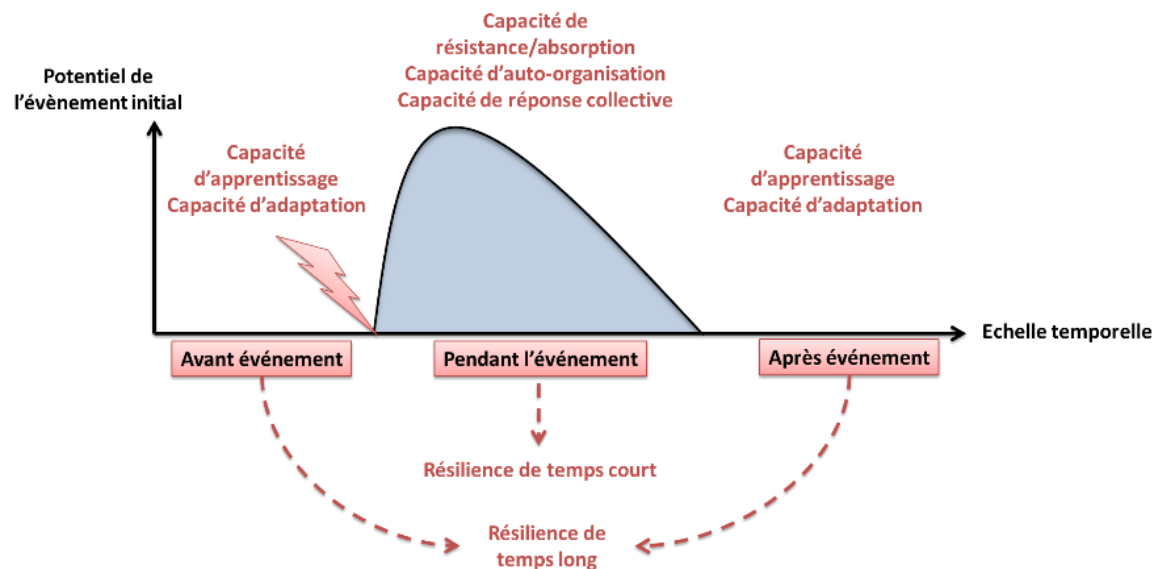


Figure 6 : Les différentes capacités de résilience urbaine (d'après UNISDR, 2012 ;Toubin *et al.*, 2012)

Par ailleurs, le terme de résilience systémique est rencontré dans la littérature afin d'accentuer la prise en compte du paradigme systémique dans les travaux de résilience urbaine (Quenault, 2014) et ainsi insister sur les interactions entre les enjeux de ce territoire.

I-1.2.2 Du risque...à sa concrétisation

Plusieurs dénominations qualifient une situation lorsqu'un évènement survient sur un territoire. Dautun (2007) propose une clarification des concepts d'incidents, accidents et catastrophes à partir d'une gradation de la gravité des phénomènes avant de proposer sa propre définition des crises de grande ampleur.

D'après les définitions données par Périlhon (2002) et Perrow (1999), un incident se déroule sur seulement une partie du système étudié engendrant des impacts matériels faibles. L'ensemble du système n'est pas menacé. L'accident est à un niveau de gradation supérieur du fait des conséquences générées sur les enjeux mais se limite à des évènements connus et répertoriés (d'après Lagadec, 1991; Lagadec, 2000). Une catastrophe possède la particularité d'être imprévue et d'entraîner des lourdes conséquences humaines, financières et matérielles quelle que soit son origine (d'après Denis, 1993; Denis, 2002; Dauphine, 2001). Les crises de grande ampleur correspondent au dernier grade de gravité d'un évènement survenu. Plusieurs caractéristiques de la définition donnée par Dautun (2007) sur les crises de grande ampleur sur un territoire ressortent :

- un évènement déclencheur endogène ou exogène au territoire avec un potentiel de danger élevé ;
- des conséquences humaines, environnementales et matérielles dramatiques ;
- une organisation du territoire déstabilisée par l'ampleur et la complexité des besoins auxquels elle doit répondre mais aussi via la présence de vulnérabilités latentes empêchant d'agir adéquatement face à la situation ;

Trois conditions sont nécessaires au développement d'une crise de grande ampleur Dautun (2007) :

- un territoire, composé d'enjeux et d'acteurs du risque, initialement vulnérable ;
- un ou une série d'évènements déclencheurs d'origine naturelle, industrielle ou terroriste ;
- la présence de facteurs aggravants techniques, humains et managériaux.

Afin de gérer ces situations et éviter qu'elles ne se produisent, les acteurs du territoire s'organisent via la mise en place de mesures de gestion des risques et des crises. Parmi ces acteurs, l'Etat Français via ses représentants aux différents échelons territoriaux joue un rôle essentiel.

I-1.2.3 Organisation de la gouvernance des territoires dans la gestion des risques et des crises

En France, la gestion des risques et des crises est classiquement appréhendée en cinq phases (d'après COFELY INEO *et al.*, 2013) permettant de réduire la vulnérabilité et d'augmenter la résilience d'un territoire face aux évènements majeurs : la connaissance de l'aléa et la vulnérabilité, l'obligation à l'information, la prévention des risques, la planification et l'organisation des secours et la gestion de crise (Figure 7). Les quatre premières phases sont axées sur l'avant et l'après crise. La dernière phase correspond à la réponse opérationnelle pendant la crise.



Figure 7 : Cinq phases de la gestion des risques et des crises des territoires en France

Les mesures prises durant ces cinq phases sont essentiellement réglementaires. D'autres mesures spécifiques à des enjeux particuliers existent mais ne sont pas présentées ici (exemples avec les enjeux des Secteurs d'Activités d'Importance Vitale ou les Installations Classées pour la Protection de l'Environnement). Quatre échelons territoriaux sont distingués : les échelles communale, départementale, zonale et nationale. Seules les phases de prévention des risques, planification et l'organisation des secours et la gestion de crise sont présentées ici du fait de l'intérêt qu'elles présentent pour le projet.

i. Prévention des risques

La prévention des risques sur les territoires français peut être abordée à partir de l'étude des risques naturels et industriels puis en se focalisant sur les événements sanitaires et terroristes. Cette phase de prévention des risques est présentée à partir des différents plans mis en œuvre pour les différents types d'événements.

Le schéma de prévention des risques naturels (document d'orientation élaboré par le préfet ; article L.565-2 code de l'environnement), le Plan de Prévention des Risques Naturels (PPRN) et le Plan de Prévention des Risques Technologiques (PPRT) sont les trois documents pour la prise en compte des risques dans l'aménagement aux niveaux départemental et communal. Les PPRN et les PPRT instituent des servitudes d'utilité publique qui sont annexées au Plan Local d'Urbanisme (PLU) au niveau communal.

Le PPRN est un dossier réglementaire de prévention prescrit par le Préfet qui réglemente l'utilisation des sols en fonction des risques naturels auxquels ils sont soumis et définit les mesures pour réduire la vulnérabilité des territoires (article L.562-1 s. du code de l'environnement). Il est constitué d'une note de présentation du contexte, une carte de zonage réglementaire et un règlement correspondant à ce zonage. Ce dernier distingue les zones exposées à un risque ou non et interdit ou soumet à prescription les constructions/ouvrages mais également peut imposer des aménagements.

Le PPRT est un outil de maîtrise des risques et de l'urbanisation autour des sites industriels à haut risque soumis au régime de l'Autorisation avec Servitude et des stockages souterrains de gaz naturel, d'hydrocarbures ou de produits chimiques à destination industrielle (article L.515-15 s. code de l'environnement). Il se compose d'une note de présentation du contexte, une carte de zonage réglementaire et un règlement qui édicte et définit des mesures spécifiques pour chaque zone (droit de préemption urbain, droit de délaissement, expropriation d'utilité publiques,...). Pour chaque zone, ce dernier fixe :

- Des mesures d'interdiction et des prescriptions pour les constructions, aménagements et usages ;
- L'instauration du droit de délaissement, du droit de préemption, ou la mise en œuvre de l'expropriation pour cause d'utilité publique dans les zones les plus exposées aux risques ;
- Des mesures de protection des populations ;
- Des servitudes d'utilité publique.

Afin de faire face à la menace terroriste, le plan gouvernemental Vigipirate est un instrument placé sous l'autorité du Premier Ministre et qui s'inscrit dans le cadre de la vigilance, de la prévention et de la protection des territoires. Ce plan a pour objectif (SGDSN ,2014) :

- D'assurer en permanence une protection adaptée des citoyens, du territoire et des intérêts de la France contre la menace terroriste ;
- De développer et maintenir une culture de vigilance de l'ensemble des acteurs de la nation afin de prévenir ou de déceler le plus en amont possible toute menace d'action terroriste ;
- De permettre une réaction rapide et coordonnée en cas de menace caractérisée ou d'action terroriste, afin de renforcer la protection, de faciliter l'intervention, d'assurer la continuité des activités d'importance vitale, et donc de limiter les effets du terrorisme.

Plusieurs acteurs s'associent avec l'Etat au plan Vigipirate. En premier lieu, l'Etat via ses ministères et ses représentants aux échelons zonal et départemental se mobilise pour faire face à la menace. Les collectivités territoriales possèdent également des capacités d'action

dans ce plan du fait qu'elles exercent des responsabilités dans de nombreux secteurs de la vie économique et sociale de la Nation (exemple : infrastructures critiques en France). Les acteurs de l'étranger et les citoyens sont aussi intégrés aux dispositifs du plan VIGIPIRATE. De la même manière que pour des événements terroristes, les aléas sanitaires sont abordés par des plans gouvernementaux (exemple avec le plan pandémie grippale 2011) qui définissent différents objectifs pour chaque échelon territorial (SGDSN, 2011).

ii. Planification et organisation des secours, gestion de crise

Les plans PIRATE et le plan ORSEC sont les deux dispositifs principaux d'intervention recensés sur les territoires en France.

Les plans PIRATE visent à permettre aux autorités gouvernementales, aux services déconcentrés de l'Etat et aux opérateurs de réagir rapidement à un événement terroriste et peuvent être déclenchés par le premier ministre (SGDSN, 2014). Deux familles de plans Pirate existent :

- Les Plans en cas d'attaque terroriste utilisant un moyen d'agression spécifique (Nucléaire Radiologique Biologique Chimique ou systèmes d'information) ;
- Les Plans en cas d'attaque terroriste se déroulant dans un "milieu" particulier (air, mer, métro,...).

Elaboré et déclenché par le Préfet, le plan d'Organisation de Réponse de Sécurité Civile (ORSEC) recense tous les moyens disponibles à utiliser en cas de crise et a pour objet l'organisation des secours revêtant une ampleur ou une nature particulière. Il organise les secours et le sauvetage, les soins médicaux, la sécurité et les liaisons et les transmissions ainsi que les transports et les travaux nécessaires. Le plan ORSEC est décliné en trois niveaux : dispositif départemental, dispositif zonal et dispositif maritime.

Au niveau départemental, le plan se décline en deux volets :

- Des dispositions générales applicables en toutes circonstances qui concernent l'organisation de base des secours, applicables à tout type de crise ;
- Des dispositions spécifiques propres à certains risques particuliers distinguant pour chacun des risques les modalités spécifiques de l'organisation des secours.

Le plan ORSEC zone est mis en œuvre en cas de catastrophe affectant deux départements au moins ou rendant nécessaire la mise en œuvre de moyens dépassant le cadre départemental. Il fixe les conditions de la coordination des opérations de secours, de l'attribution des moyens et de leur emploi par l'autorité compétente pour diriger les secours. Le plan ORSEC maritime détermine l'organisation générale des secours et recense l'ensemble des moyens publics et privés susceptibles d'être mis en œuvre et définit les conditions de leur emploi. Ce plan s'applique aux risques existants en mer. Il existe d'autres plans dans la planification et l'organisation des secours qui sont des volets de dispositions spécifiques du plan ORSEC. C'est le cas des Plans Particuliers d'Intervention (PPI) pour les Installations Nucléaires de Base (INB), les sites SEVESO, les ouvrages liés au Transport de Matières Dangereuses (TMD), les stockages du gaz et les grands barrages et les Plans Communaux de Sauvegarde (PCS) pour les communes. Cette dernière disposition est élaborée sous la responsabilité du Maire et définit l'organisation prévue par la commune pour assurer l'alerte, l'information, la protection et le soutien de la population au regard des risques encourus. Il comprend :

- Le Document d'Information Communale sur les Risques Majeurs (DICRIM) ;
- Un diagnostic des risques et des vulnérabilités locales ;
- Les dispositifs communaux d'information et de diffusion de l'alerte à la population ;
- Les mesures de soutien de la population ;

- Les mesures de sauvegarde et de protection ;
- Les modalités de mise en œuvre de la réserve communale de sécurité civile lorsqu'elle a été mise en place.

En cas de survenue d'un évènement engendrant une crise sur un territoire, le Maire et le Préfet bénéficient de pouvoirs étendus en prenant la fonction de Direction des Opérations de Secours (DOS) afin de coordonner la réponse opérationnelle. Ils mettent en œuvre le Plan Communal de Sauvegarde pour le Maire et le plan ORSEC pour le Préfet. L'Etat et ses services déconcentrés peuvent déclencher le signal national d'alerte afin d'alerter les populations en cas d'un danger grave et user du pouvoir de réquisition (bien ou service, personne nécessaire au fonctionnement de ce service ou à l'usage de ce bien, les logements par exemple), mesure utile jusqu'à ce que l'atteinte à l'ordre public ait pris fin.

Les différentes mesures mises en place pour l'organisation de la gestion des risques et des crises du territoire et ses caractéristiques amènent à le considérer comme un système complexe.

I-1.3. Considérer le territoire comme un système complexe

Les caractéristiques du territoire et son organisation pour la gestion des risques et des crises ont été développées. Il est alors possible de considérer le territoire comme un système complexe. Avant de faire ce rapprochement, l'approche et la modélisation systémique sont présentées.

I-1.3.1 Approche systémique

L'approche systémique a remplacé l'approche analytique afin d'étudier la complexité des grands systèmes biologiques, économiques et sociaux. Contrairement à l'approche analytique adaptée à l'étude des systèmes stables constitués par un nombre d'éléments limités et aux interactions linéaires, l'approche systémique vise à englober la totalité des éléments étudiés en intégrant leurs interactions (De Rosnay, 1975) .

Garbolino *et al.*(2010) à la suite de Durand (2006), définit quatre grands concepts structurant l'approche systémique. Il s'agit de :

- L'interaction entre les éléments puisque ceux-ci exercent une ou plusieurs actions et reçoivent une ou plusieurs actions d'autres éléments. Les liens entre les composants contiennent des relations de cause à effet mais également des boucles de rétroactions ;
- La globalité qui traduit le fait que le système réagit différemment de la somme de ses parties (à cause de ses interactions) ;
- L'organisation considère la structure et le fonctionnement du système. L'agencement des éléments permet la réalisation de fonctions et ainsi répondre à un but fixé ;
- La complexité qui regroupe les propriétés d'auto-organisation (capacité d'un système complexe à changer son organisation sans influence causale de son environnement) et d'émergence (=apparition de nouvelles propriétés et dynamiques du système).

Par ailleurs, l'approche systémique décline la notion de système défini comme « un ensemble d'éléments en interaction dynamique, organisés en fonction d'un but » (De Rosnay, 1975). Les éléments sont des composants du système qui échangent (=interaction dynamique) en interne ou dans l'environnement (flux de matières, d'énergie, d'informations). Ces éléments sont organisés afin de réaliser des fonctions à partir des finalités du système. Différentes typologies de systèmes existent comme les systèmes ouverts/fermés sur leur environnement, les systèmes naturels/artificiels/ sociaux ou encore les systèmes organisés hiérarchiquement /systèmes en réseau. Un système comporte plusieurs niveaux d'abstraction. Un système est formé de sous-systèmes, eux-mêmes intégrant des composants. Un système peut également être englobé par un autre système. Il s'agit alors d'un système de systèmes défini comme un « système résultant du fonctionnement collaboratif de systèmes constituants qui peuvent fonctionner de façon autonome pour remplir leur propre mission opérationnelle » (AFIS, 2014). D'autre part, la littérature distingue un système complexe d'un système compliqué (Le Moigne, 1977). Ce dernier est un système avec de nombreux éléments pouvant être analysés indépendamment. Au contraire, un système complexe est défini comme « un ensemble d'éléments qui fait émerger de nouvelles propriétés ne se trouvant pas dans les éléments eux-mêmes» (Le Moigne, 1977).

Une propriété du système concerne la précision dont il peut faire l'objet à partir d'une description structurelle, fonctionnelle et historique (Donnadieu *et al.*, 2002). La description structurelle répond à la question « de quoi est fait le système ». Elle précise les interactions entre les sous-systèmes et leurs éléments constitutifs et les limites entre le système et son environnement. La description fonctionnelle répond à la question de ce que l'objet fait dans son environnement ou à quoi il sert en traduisant ses finalités. Cette question reste assez simple pour les systèmes artificiels comme les robots mais peut s'avérer plus difficile dans le cas des systèmes ouverts et vivants. La description comportementale répond à la question « qu'est-ce que l'objet devient ? ». Elle permet d'observer le système dans le temps à partir des attributs de mémoire, trajectoire et dynamique.

Afin de représenter au mieux les systèmes, l'approche systémique prend forme dans le processus de modélisation.

I-1.3.2 Modélisation systémique

Le Moigne (1977) définit la modélisation comme « l'action d'élaboration et de construction intentionnelle, par composition de symboles, de modèles susceptibles de rendre intelligible un phénomène perçu comme complexe, et d'amplifier le raisonnement de l'acteur projetant une intervention délibérée au sein du phénomène ; raisonnement visant notamment à anticiper les conséquences de ces projets d'actions possibles ». La modélisation d'un système intervient par une procédure de systémographie (Le Moigne, 1989). Le phénomène perçu complexe est assimilé à un système et un raisonnement instrumental est réalisé pour construire un modèle du phénomène articulé en trois phases (Figure 8). Il s'agit des phases :

- De cadrage traduisant la construction du modèle par isomorphie avec un système afin d'établir une correspondance entre tous les traits de l'objet étudié et ceux du modèle ;
- De développement mettant en avant la documentation du modèle par correspondance homomorphique de celui-ci avec les traits perçus du phénomène afin d'établir une correspondance entre les traits du phénomène et les traits d'un modèle plus commodément étudiable ;
- d'interprétation correspondant aux simulations d'actions possibles sur le modèle pour anticiper les conséquences éventuelles dans les phénomènes.

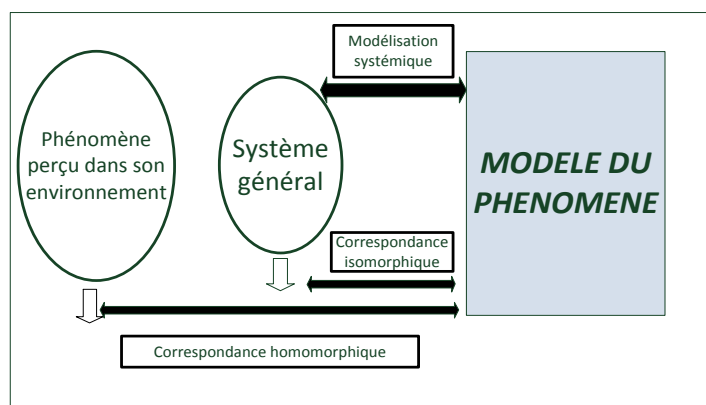


Figure 8 : Systémographie d'un phénomène complexe non identifiable

Cette procédure permet la réalisation de quatre catégories de modèles non exclusives (Walliser 1977; Durand 2006) :

- **Modèle cognitif** : comprendre ou connaître un système existant ;
- **Modèle normatif** : définir un système à réaliser ;
- **Modèle prévisionnel** : prévoir les sorties ou simuler des comportements non encore observés d'un système ;
- **Modèle décisionnel** : définir le pilotage d'un système.

La représentation du système est réalisée par un langage de modélisation. Celui-ci va du langage graphique (cartes, plans,...) au langage informatique comme le langage UML. Ces derniers sont opérables sur ordinateur et peuvent déboucher sur des simulations.

La modélisation systémique est devenue incontournable pour analyser les systèmes complexes. C'est également le cas pour étudier l'intégrité et la complexité du système complexe « territoire » (Bouchon, 2011).

I-1.3.3 Le territoire est un système complexe

Les caractéristiques du territoire et son organisation dans la gestion des risques et des crises ainsi que la présentation de l'approche et modélisation systémique permettent d'assimiler le territoire à un système complexe. Bien que plusieurs auteurs évoquent déjà le territoire comme un système complexe, l'intérêt de cette association est ici de se focaliser sur le territoire avant, pendant et après un événement majeur.

La description structurelle du système territoire porte sur ses éléments et sa frontière avec l'environnement. Les constituants du territoire sont la population et l'espace géographique qui interagissent entre eux. L'espace contient notamment les réseaux, les lieux ou des espacements (Voiron *et al.*, 2005). La population produit l'espace et les éléments de l'espace rétroagissent sur l'action des populations en créant des contraintes ou en exerçant une attractivité (Voiron *et al.*, 2005). Par exemple, les hommes construisent des habitations à proximité des cours d'eau. En rétroaction, en cas de fortes pluies, les cours d'eau débordent et inondent les habitations.

Les frontières du système territoire sont identiques à celles du territoire (administratives, physiques,..) et permettent de délimiter le système de son environnement. Elles permettent aussi de distinguer le caractère endogène ou exogène d'un événement majeur impactant le territoire.

Le territoire est un système complexe du fait qu'il est possible de le décrire fonctionnellement. Il possède des finalités et des fonctions. Une finalité du territoire peut être de satisfaire les besoins essentiels des acteurs et assurer leur reproduction (Leberre, 1992) ou encore d'assurer la sécurité du territoire en période de fonctionnement normal et en cas de crise. La gouvernance des territoires assure un rôle primordial dans la contribution de cette finalité (Maire à l'échelle locale ou des Préfets à l'échelle départementale ou zonale). Les fonctions du territoire associées aux finalités vont alors être de mettre en place une politique d'aménagement du territoire, informer les populations ou planifier la réponse des secours à un événement majeur. La complexité du territoire apparaît alors dans l'établissement de ces nouvelles propriétés. L'organisation de la gestion des risques et des crises du territoire est à la fois une cause (exemple : sauvegarde la population pour les territoires communaux) et conséquence (exemple : développement économique) de cette complexité.

Par ailleurs, le territoire évolue dans le temps et possède sa propre identité. Suite aux événements survenus, le territoire apprend par retour d'expérience. Il met alors en œuvre ses capacités d'apprentissage pour accroître sa résilience dans le temps. Le territoire dispose également de plans d'intervention capables de modifier son organisation en cas d'un événement. Il s'agit par exemple des plans ORSEC et du PCS.

Il a été souligné en introduction le rôle important des infrastructures critiques pour les sociétés en période normale et de crise. Ces entités font partie de l'espace géographique du territoire. Elles sont donc des composants du système complexe territoire.

I-1.4. Description des systèmes techniques d'infrastructures critiques

Les infrastructures critiques (IC) constituent des composants du territoire. Elles peuvent être appréhendées par leur dimension technique et à partir de l'approche systémique car elles (d'après Bouchon, 2006) :

- Sont une agrégation de sous-systèmes et composants en interactions et elles évoluent dans un environnement tel que le contexte social, politique ou encore économique = description structurelle ;
- Sont organisées dans le but d'assurer la sécurité de fourniture des services essentiels = description fonctionnelle ;
- Sont soumises à des modifications dans le temps comme l'évolution de la réglementation ou les changements démographiques = description comportementale.

Par ailleurs, ces composants sont localisés dans l'espace géographique du territoire. L'approche spatiale appréhende ces infrastructures critiques afin de tenir compte des contraintes du territoire comme son accessibilité ou ses discontinuités. Cette approche devient alors complémentaire de l'approche systémique (Bouchon, 2011). L'apport de chaque description démontre ainsi la complexité et l'hétérogénéité des infrastructures critiques (Bouchon, 2011) (Tableau 1).

	Approche systémique	Approche spatiale
Composant	Infrastructures Critiques	Localisations des IC Distance entre les IC
Fonctions et Comportement	Fourniture de service délivré Mode de fonctionnement	Etendue géographique où le service est délivré
Interactions	Types d'interdépendances Couplage	Localisation des interdépendances
Relations avec l'environnement	Contexte social, économique et réglementaire	Limite des IC

Tableau 1 : Caractéristiques des infrastructures critiques (d'après Bouchon, 2011)

I-1.4.1 Composition des systèmes techniques d'infrastructures critiques

Il n'existe pas de typologie unique des infrastructures critiques. Bouchon (2011) met en avant dans sa thèse les secteurs d'IC étudiés par les organisations et pays dans leur politique de protection des IC. Quatorze secteurs sont recensés (Figure 9).

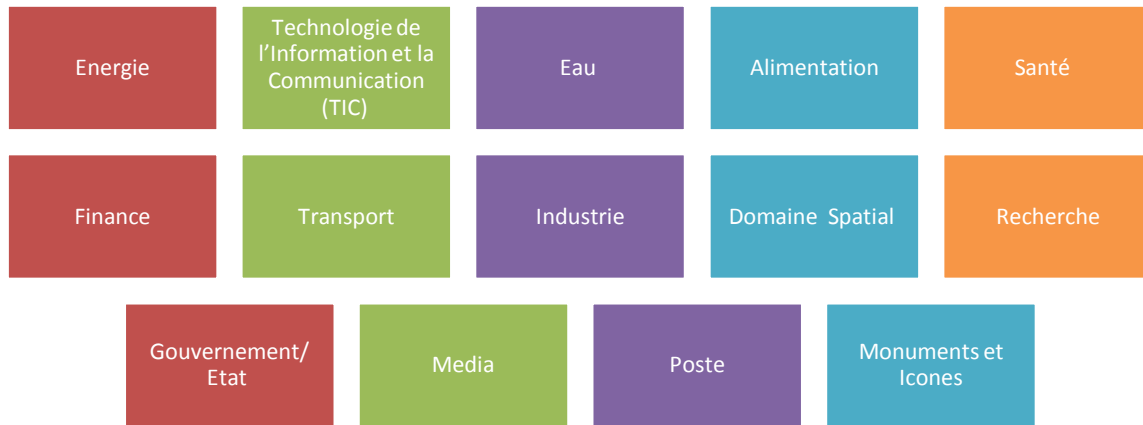


Figure 9 : Liste des secteurs d'infrastructures critiques dans les politiques de protection (d'après Bouchon, 2011)

Ces secteurs se composent de différents types d'infrastructures critiques comme des réseaux de distribution ou de transport, des installations, des ouvrages ou des réseaux (Bouchon, 2011). En France, les infrastructures critiques appelées Points d'Importance Vitale sont des « ouvrages », « établissements » ou « installations » (SGDSN, 2014). Ce sont les nœuds de connexions des réseaux qui peuvent être des IC et non des lignes des réseaux (Coursaget 2011). Ces exemples montrent qu'il existe une hétérogénéité des IC liées aux différentes granulométries rencontrées. Les infrastructures critiques sont à la fois les réseaux de production ou distribution mais également les nœuds de ces réseaux qui sont des ouvrages, installations et établissements.

L'approche spatiale localise les IC, estime la distance entre elles et leurs interactions. Elle permet alors d'avoir une représentation de l'organisation spatiale de ces IC sur le territoire.

I-1.4.2 Comportement et fonctions des systèmes techniques d'IC

Les infrastructures critiques évoluent dans le temps en alternant leur mode de fonctionnement (exploitation, dégradée, maintenance, remise en service ou arrêt de fonctionnement,...). Ces différents modes de fonctionnement associent des échelles temporelles variées et sont influencés par des paramètres techniques intrinsèques aux IC (Rinaldi *et al.*, 2001). Les stocks ou les ressources alternatives utilisés par l'IC en mode dégradé sont des illustrations de paramètres techniques.

D'autre part, l'évolution du comportement des IC va influencer la réalisation des missions ou fonctions des infrastructures critiques faisant varier la fourniture de service d'un état optimal (capacité maximale de service) à nul (Rinaldi *et al.*, 2001). (Petit, 2009) identifie plusieurs exemples de missions et fonctions selon respectivement deux niveaux de granulométrie des IC :

- Le niveau supérieur regroupe par exemple les infrastructures critiques de réseaux comme l'IC de l'eau, l'électricité ou de transport. Ces dernières réalisent des missions de fourniture de ressource. Pour l'infrastructure critique de l'eau, deux de ses missions sont de fournir de l'eau avec certaines caractéristiques de pression pour la protection incendie ou encore de fournir de l'eau avec certains critères de qualité de l'alimentation en eau potable.
- Pour le niveau inférieur, il s'agit des infrastructures critiques définies comme des « installations », « établissements » ou « ouvrages » réalisant des fonctions. Par exemple, l'infrastructure critique d'électricité est composée au niveau inférieur d'IC comme les centrales nucléaires ou centrales thermiques. Les fonctions sont définies comme étant un ensemble d'opérations orientées vers les mêmes objectifs (Petit, 2009). Il s'agit par exemple des fonctions de :
 - Production-Transformation ;
 - Transport-Distribution
 - Stockage ;
 - Maintenance-Entretien ;
 - Contrôle ;
 - Protection :

L'approche spatiale permet de connaître l'étendue géographique des missions et fonctions des IC. Ces dernières fournissent des services à des échelles variables (Robert *et al.*, 2009). En France, il peut s'agir du territoire à l'échelle nationale comme le réseau de transport d'électricité ou les centrales nucléaires de production d'électricité mais aussi des territoires plus restreints comme pour le réseau d'eau potable et ses stations de production d'eau potable.

I-1.4.3 Interactions entre les systèmes techniques d'IC

Les IC interagissent entre elles notamment à partir de la mise en mouvement de cinq catégories de ressources (d'après Robert *et al.*, 2007) : matière/énergie/bien, humaine, information/donnée, financière/assurance et service. Les trois premières catégories de ressources peuvent être caractérisées par les critères :

- De quantité et de la qualité pour les ressources de matière/énergie/bien (Petit, 2009) ;
- De disponibilité, mobilité et de compétence pour la ressource humaine (Robert *et al.*, 2008) ;
- D'authenticité, confidentialité, intégrité, disponibilité, débit de transfert et temps d'attente pour les ressources de données (Petit, 2009).

Ces échanges de ressources illustrent les interdépendances physiques, cybernétiques et logiques entre les IC (Rinaldi *et al.*, 2001).

D'autre part, ces interdépendances sont précisées à partir des caractéristiques du couplage entre les IC. Trois caractéristiques sont distinguées par Rinaldi *et al.* (2001) :

- Le couplage fort ou faible. Dans le cas d'un fort couplage, une IC est hautement dépendante d'une autre. En cas de défaillance, la propagation se fait rapidement. C'est le cas par exemple des IC qui dépendent de l'électricité car cette ressource est non-stockable.
- L'ordre du couplage. Cette caractéristique indique si deux IC sont directement dépendantes (couplage du premier ordre) ou indirectement via une ou plusieurs autres IC ;

- Le couplage linéaire ou complexe. Il ne s'agit pas de la définition mathématique de linéaire. Les interactions linéaires sont celles attendues par la conception alors que les interactions complexes ne sont pas directement visibles ou compréhensibles.

Les interdépendances sont à l'origine des différents types de défaillances pouvant survenir sur les IC. Trois types sont recensés par Rinaldi *et al.* (2001) : cascade, escalade et cause commune.

L'effet cascade décrit un événement impactant une IC qui provoque la défaillance d'une autre IC et ainsi de suite. Par exemple, suite à une inondation, un poste de transformation ne fonctionne plus. Il ne peut alors plus alimenter sa zone d'alimentation. Si des pompes du réseau d'eau potable se situent dans cette zone d'alimentation, alors à leur tour, elles sont défaillantes. Les effets dominos ou cascade se distinguent par les effets internes ou externes (Michel-kerjan, 2003). Lorsqu'il est interne au réseau, la diffusion se fait le long du réseau et un grand nombre d'utilisateurs est impacté. Lors d'un effet cascade externe, c'est l'hyper-connexion entre les réseaux qui peut déclencher une défaillance sur un autre réseau. Par exemple, en cas de défaillance du réseau électrique, celui-ci impactera notamment les réseaux de transport comme ce fut le cas lors du Black-out aux États-Unis en 2003.

L'effet escalade est une défaillance indépendante sur une autre IC déjà impactée par un événement qui va aggraver les impacts et le temps de dégradation sur cette seconde IC. Par exemple, un poste électrique est défaillant. En parallèle, il y a des embouteillages dans les IC de transport ce qui provoque un retardement du personnel de réparation pour arriver sur les lieux des IC électriques.

Une cause commune de défaillance décrit plusieurs IC impactées par le même événement. Pour illustration, dans le cas d'une inondation, cette dernière peut impacter plusieurs IC simultanément.

L'approche spatiale permet la localisation des interdépendances et l'observation de la direction des flux entre les IC (Bouchon, 2011).

I-1.4.4 L'environnement des systèmes techniques d'IC

L'environnement influence les systèmes techniques d'IC et réciproquement. Il y a donc une rétroaction. L'environnement est associé ici au contexte économique, social, politique et réglementaire des infrastructures critiques (Bouchon, 2011). L'approche spatiale délimite les frontières entre les systèmes d'IC et le milieu environnant (Bouchon, 2011).

Le contexte économique influence les activités par l'instauration des règles des marchés. Bien qu'elles répondent pour la plupart à un besoin de service public, les entités sont pour la plupart privées et doivent répondre à des accords économiques (d'après Rinaldi *et al.*, 2001).

Le contexte social intervient également par les interactions entre les humains et les infrastructures critiques. Trois types de relations existantes sont identifiées par Robert *et al.* (2008) qui cite Barnes *et al.* (2005) :

- Les humains ont besoin des infrastructures pour les services que celles-ci leur procurent. Ce besoin est influencé par les facteurs d'urbanisation ou de démographie mais aussi la saison voire le moment de la journée.
- Les IC ont besoin des humains pour assurer leur fonctionnement mais aussi pour l'innovation qu'ils leur apportent. Par exemple, un centre hospitalier a besoin d'un personnel important. Celui-ci doit être également qualifié et formé selon les tâches à effectuer.
- Faciliter les communications et la coopération entre IC.

Les politiques publiques/décisions gouvernementales influent aussi sur les infrastructures critiques par la privatisation de certaines entreprises et l'ouverture à la concurrence ou encore des orientations politiques comme les objectifs sur le nucléaire et les énergies renouvelables dans la production d'électricité. Des investissements publics vont également modifier l'évolution des infrastructures critiques comme les projets d'infrastructures de transport (autoroutes, aéroports,...) (d'après Rinaldi *et al.*, 2001).

Le contexte réglementaire influence les infrastructures critiques comme le montre le dispositif français des Secteurs d'Activités d'Importance Vitale (SAIV). Douze secteurs sont recensés afin de protéger leurs installations en priorité contre la malveillance et le terrorisme (SGDSN, 2014). Cependant, les dispositions prises sont également pertinentes vis-à-vis des aléas technologiques ou naturels (Coursaget, 2011). Plusieurs niveaux étatiques interviennent pour assurer la sécurité des activités d'importance vitale : interministériel, ministériel, zonal et départemental.

Au niveau interministériel, le Secrétariat Général de Défense et de Sécurité Nationale (SGDSN) publie les instructions ou circulaires interprétatives de la réglementation sur la sécurité des activités d'importance vitale. Au niveau des ministères, chaque ministre coordonnateur veille à l'application du dispositif des SAIV dont il a la charge et a notamment pour mission d'élaborer la ou les Directive(s) Nationale(s) de Sécurité (DNS) correspondante(s). Ces dernières définissent le besoin de sécurité des fonctions essentielles. Différents scénarios de menaces sont également hiérarchisés afin de préciser les objectifs et politiques de sécurité du secteur. Au niveau zonal, le préfet de zone de défense et de sécurité (ZDS) est l'acteur territorial en charge de la coordination du dispositif SAIV. Au niveau départemental, le préfet est chargé de la mise en œuvre du dispositif SAIV (SGDSN, 2014).

Le dispositif SAIV se décline pour chaque opérateur d'IC par un Plan de Sécurité Opérateur (PSO) et pour chaque Point d'Importance Vitale (PIV) par un Plan Particulier de Protection (PPP) et un Plan Particulier Externe (PPE) (Figure 10).

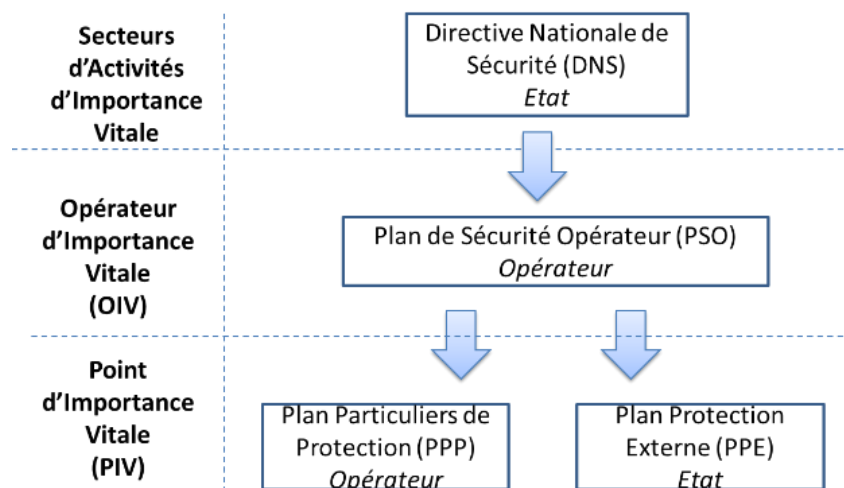


Figure 10 : Dispositif des Secteurs d'Activités d'Importance Vitale (SAIV) (d'après SGDSN, 2014)

Le PPP et le PPE réalisés respectivement par l'opérateur et l'Etat ont pour but de mettre en place des mesures de protection interne et externe destinées « les unes et les autres à mettre en échec ou à défaut, retarder les tentatives malveillantes pouvant être effectuées par une ou plusieurs personnes, à en limiter les effets et à faciliter la continuité d'activité ou le rétablissement d'activité » (SGDSN, 2014). Par ailleurs, un plan de continuité est

obligatoire pour les opérateurs d'IC et a pour « objet de décliner la stratégie et l'ensemble des dispositions qui sont prévues pour garantir à une organisation la reprise et la continuité de ses activités à la suite d'un sinistre ou d'un évènement perturbant gravement son fonctionnement normal » (SGDSN, 2014). Ce plan renforce la résilience des IC face à des évènements déstabilisants afin de réduire les conséquences d'une indisponibilité d'une ressource et en favorisant la mise en place de solution palliative, de contournement, de secours afin de faire face à une perte d'une ressource (SGDSN, 2014). Ces plans de continuité s'intègrent avec les plans d'urgence (Plan d'Opération Interne et Plan Particulier d'Intervention pour les ICPE soumis à autorisation avec servitude) dans une même logique de gestion de crise (SGDSN, 2014).

I-1.5. Etat des lieux de la gestion des risques et des crises des infrastructures critiques

En tant que composants du territoire, les infrastructures critiques sont des enjeux mais également des sources de dangers internes au territoire. Ces enjeux font l'objet d'études spécifiques en matière de gestion des risques et des crises.

Trois états de l'art des travaux méthodologiques sur la gestion des risques des IC sont présentés et discutés (Yusta *et al.*, 2011; Pederson *et al.*, 2006 ; Giannopoulos *et al.*, 2012). Il existe deux tendances (Yusta *et al.*, 2011). D'une part, l'étude individuelle des IC et d'autre part l'étude du comportement des IC interdépendantes qui s'appuient sur des outils d'analyse. Les cinq principaux outils sont décrits et comparés à l'aide de critères d'après deux états de l'art de la littérature (Ouyang, 2014; Eusgeld *et al.*, 2008).

Enfin, dans un dernier temps, les études portant spécifiquement sur la remise en service en cas de crise des réseaux techniques considérés comme des IC sont présentés (tirés de Lhomme, 2012).

I-1.5.1 Travaux méthodologiques existants sur les infrastructures critiques

i. Description des critères d'analyse

Trois revues de la littérature comparent des méthodologies de gestion des risques des infrastructures critiques. Pederson *et al.* (2006) étudient trente méthodologies, Yusta *et al.* (2011) cinquante-cinq et Giannopoulos *et al.* (2012) vingt et une. Outre les critères communs et spécifiques de comparaison des méthodologies exposés dans la suite, ces états de l'art se différencient par la prise en compte des interdépendances ou non des IC. Ainsi, Pederson *et al.* (2006) se concentrent sur les méthodologies traitant des interdépendances entre les IC alors que les deux autres états de l'art étudient l'ensemble des travaux méthodologiques trouvés dans la littérature. Plusieurs critères permettent de comparer les méthodologies (Tableau 2).

Critères	(Pederson et al., 2006)	(Yusta et al., 2011)	(Giannopoulos, 2012)
Objectifs des méthodologies	X	X	X
Outils de modélisation/simulation ou empiriques	X	X	X
Type d'interdépendances			X
Secteurs d'activités	X	X	X
Facteurs de résilience			X
Modèle couplé ou intégré	X		
Identification étapes du management du risque		X	
Matériel/logiciel informatique requis	X		
Utilisateurs	X		X
Maturité	X	X	
Accessibilité		X	
Références bibliographiques	X	X	X

Tableau 2: Critères de comparaison des méthodologies via trois états de l'art

Par ailleurs, les revues se distinguent via l'étude d'un ou plusieurs critères spécifiques. Ainsi, Pederson *et al.*(2006) détermine les outils de modélisation et simulation qui sont couplés ou intégrés dans la même méthodologie alors que Yusta *et al.*(2011) identifie à quelles étapes de management des risques (identification des dangers, évaluation des risques, priorités des actions, implémentation des mesures, efficacité des mesures) les travaux s'appliquent. Quant à Giannopoulos *et al.*(2012) il discerne la prise en compte des types interdépendances et les mesures de résilience mises en place.

Ces critères d'analyse permettent ainsi d'obtenir plusieurs résultats dont deux orientations d'étude des méthodologies (Yusta *et al.*, 2011).

ii. Orientations méthodologiques

Yusta *et al.*(2011) distingue les méthodologies qui identifient les méthodes, techniques, outils pour décrire l'état d'une infrastructure critique et celles qui appréhendent le comportement des infrastructures critiques interdépendantes à partir de l'utilisation d'outils d'analyse des interdépendances comme des outils de modélisation et simulation (exemples : simulation des systèmes multi-agent, dynamique des systèmes,..) ou des outils empiriques (exemple : bases de données).

L'approche prédictive permet de modéliser et simuler le comportement d'infrastructures interdépendantes alors que l'approche empirique utilise le retour d'expérience d'évènements passés pour comprendre et identifier les interdépendances (Johansson *et al.*, 2010).

Dans le cas des approches prédictives, les méthodologies utilisent des outils de modélisation et simulation afin d'analyser le comportement des infrastructures critiques en ayant la possibilité de prendre en compte l'aspect dynamique. Ces outils peuvent également être associés à des outils supplémentaires comme des Systèmes d'Information Géographique (SIG) ou des algorithmes d'optimisation (d'après Yusta *et al.*(2011). Les travaux basés sur l'approche empirique sont les moins nombreux notamment car l'intérêt porté aux IC est récent et induit un faible nombre de retours d'expériences disponibles (Lhomme, 2012; Rahman *et al.*, 2009). D'autre part, la collecte des données est rendue difficile d'une part par leur faible vulgarisation ou accessibilité et d'autre part du fait de la complexité des mécanismes d'endommagement des interdépendances entre les IC.

Les attentes du projet conduisent à présenter et comparer cinq outils d'analyse des interdépendances de l'approche prédictive dans la partie suivante. A ce titre, il s'agit d'outils matures qui ont été utilisés plus d'une vingtaine de fois dans les méthodologies d'étude des IC (d'après Ouyang,2014).

I-1.5.2 Description et comparaison des principaux outils de modélisation et simulation

Cinq outils de modélisation et simulation sont présentés ci-après. Ils sont comparés à l'aide de critères basés sur les travaux de Ouyang (2014) et Eusgeld *et al.*(2008).

i. Recensement des critères

Treize critères de comparaison sont utilisés par Eusgeld *et al.*(2008) et Ouyang (2014) :

- Approche de modélisation et simulation via le type d'analyse (critère 1) et la stratégie adoptée (critère 2) ;
- Les caractéristiques de simulation par le type (critère 3) et la vitesse (critère 4) ;
- Le type d'interdépendance pris en compte (critère 5) ;
- Le type de menace (critère 6) et le type de défaillance (critère 7) ;
- Les données d'entrée via la qualité/quantité/accessibilité (critère 8 et 9) et les types des résultats (critère 10) ;
- Les stratégies de résilience prises en compte (critères 11, 12 et 13).

Les critères sont définis à l'aide du Tableau 3 à l'exception des stratégies de résilience. Celles-ci s'appuient sur une définition de la résilience qui distingue trois capacités (Ouyang, 2014) : la résistance, l'absorption et la remise en service.

Les stratégies associées à la capacité de résistance sont (critère 11) :

- 1.1 Améliorer l'organisation et la structure administrative pour augmenter les connaissances sur les signaux d'alerte précoces ;
- 1.2 Ajouter et mettre à jour des contraintes de sécurité aux opérateurs des entités pour réduire la probabilité d'un événement (clôtures, barrières,...) ;
- 1.3 Apprendre du retour d'expérience ;
- 1.4 Mise en place d'une surveillance du système en temps réel ;
- 1.5 Prévention aux usagers des services essentiels pour réduire leur demande en cas d'un événement ;

Les stratégies concernant la capacité d'absorption sont (critère 12) :

- 2.1 Améliorer l'organisation et la structure administrative pour accélérer les décisions d'urgence (partage d'informations, exercices,...) ;
- 2.2 Optimiser et ajuster la topologie des IC ;
- 2.3 Mettre en place des redondances, mesures alternatives et de substitution pour diminuer l'impact des interdépendances ;
- 2.4 Gérer le comportement du consommateur pour ajuster le service du système en cas d'urgence.

Les dernières stratégies concernent la capacité de remise en service des IC (critère 13) :

- 3.1 Améliorer l'organisation pour accélérer la coordination et les décisions de restauration et de coordination ;
- 3.2 Mettre en place une plateforme de décisions pour le choix des règles de priorités, optimiser les ressources disponibles.

Les résultats de l'application de chaque critère pour les cinq outils d'analyse des interdépendances sont commentés dans la description des outils d'analyse des interdépendances et résumés par le Tableau 4.

	Critères	Description			
Approche de modélisation et simulation	1) Types d'analyse	(a) Analyser les interdépendances de manière générale	(b) Analyser et identifier les impacts des interdépendances « cachées » à partir de puissantes simulations informatiques		
	2) Stratégies de modélisation	(a) « Top-down »	« Botton-up » (b)		
Caractéristiques de simulation	3) Types de simulation	(a) Discret	Continu (b)		
	4) Vitesses de simulation	(a) Moins d'un seconde	(b) Entre plusieurs secondes et minutes	(C) Entre plusieurs minutes à plusieurs heures	
5) Types d'interdépendances		(a) Physiques	(b) Cybernétiques	(c) Géographique	(d) Logique
La menace par son type et origine le type de déclenchement	6) Types d'évènement	(a) Catastrophe naturelle ou environnementale	(b) Accident industriel	(c) Acte de malveillance ou terrorisme	
	7) Types de défaillances	(a) Cascade	(b) Escalade	(c) Cause commune	
Les données d'entrée via la qualité/quantité/ accessibilité et les types des résultats	8) Quantité des données	(a) Faible	(b) Moyenne	(c) Elevée	
	9) Accessibilité des données	(a) Facile	(b) Moyenne	(c) Difficile	
	10) Types de résultat	(a) Evaluation de la vulnérabilité	(b) Analyse des défaillances	(c) Stratégie de prévention, mitigation et d'auto-organisation	(d) Production d'information sur les interdépendances

Tableau 3 : Description des critères de comparaison des outils d'analyse des interdépendances entre IC utilisés par les méthodologies prédictives (d'après les travaux de Ouyang (2014) et Eusgeld *et al.*(2008))

	Système multi-agents	Outil à base de graphes	Dynamique des systèmes	Modèle non-opérabilité entrée-sortie	Réseaux de Pétri
Types d'analyse	b)	a), b)	a), b)	a)	a), b)
Stratégies de modélisation	b)	a)	a)	a)	a)
Types de simulation	a)	a), b)	a), b)	b)	a)
Vitesses de simulation	c)	b), c)	b), c)	a)	b), c)
Types d'interdépendances	a), b), c), d)	a), b)	a), b)	a)	a)
Types d'évènement	a), b), c)	a), b), c)	a), b), c)	a), b), c)	a), b), c)
Types de défaillances	a), b), c)	a), c)	a)	a)	a), c)
Quantité des données	c)	b), c)	b), c)	a)	b), c)
Accessibilité des données	c)	b)	c)	a)	b), c)
Types de résultat	b), d)	b), d)	d)	b)	b), d)
Stratégies de résilience	1.1 ; 1.2 ; 1.3 ; 1.4 ; 1.5 ; 2.1 ; 2.2 ; 2.3 ; 2.4 ; 3.1 ; 3.2	2.2 ; 2.3	1.2 ; 1.4 ; 2.2 ; 2.3 ; 3.2		1.2 ; 1.4 ; 2.2 ; 2.3 ; 3.2

Tableau 4 : Résultats de l'application des critères de comparaison aux cinq outils d'analyse des interdépendances entre IC (les travaux de Ouyang (2014) et Eusgeld *et al.*(2008))

ii. Modèle non-opérabilité entrée-sortie

Le modèle non-opérabilité entrée-sortie se base sur le modèle économique d'équilibre général développé par Wassily Leontief. Ce dernier modélise les actions de production, des échanges intersectoriels et de la consommation d'une économie. Le tableau entrée-sortie constitue le cœur de l'analyse de Leontief en présentant les comptes de production et d'exploitation des branches et réalise l'équilibre des ressources et des emplois de biens et services (Le portail des ministères économiques et financiers, 2014).

Sur la base de ces travaux, Haimès *et al.* (2005), ont développé le modèle de non-opérabilité entrée-sortie applicable aux secteurs d'infrastructures critiques. Le but est d'utiliser des données économiques commerciales afin d'identifier d'éventuelles corrélations entre les secteurs (comme par exemple identifier des secteurs dont les bénéfices et les pertes augmentent conjointement de manière quasi-systématique). Ces corrélations sont alors interprétées comme des interdépendances et elles peuvent être quantifiées (Santos, 2006 cité dans Lhomme, 2012). L'hypothèse principale concerne la stabilité du modèle (Haimès *et al.*, 2005). Les entrées et les sorties des industries doivent s'équilibrer avec la consommation finale des secteurs. Cette hypothèse est vérifiée pour une longue période de temps (une année). La notion de non-opérabilité est définie comme étant la valeur de perte fonctionnelle d'un secteur. Cet outil détermine les pertes d'opérabilité des secteurs interdépendants à partir d'une valeur de non-opérabilité d'un secteur. L'avantage de cet outil est de pouvoir utiliser des données statistiques afin de calculer des pertes économiques des secteurs à partir des valeurs de non-opérabilité. Le modèle non-opérabilité entrée-sortie est introduit par la formule $q = A*q + c^*$ avec :

- c^* , le vecteur de perturbation de la demande exprimé par la dégradation de la demande finale (exemple : réduction de la demande suite à un attentat) ;
- A^* , la matrice d'interdépendance qui indique le degré de couplage entre les secteurs industriels ;
- q est le vecteur de non-opérabilité. Les éléments du vecteur q représentent le ratio de production non-réalisée sur le niveau de production planifié du secteur.

D'après les critères de comparaison déterminés par Eusgeld *et al.* (2008) et Ouyang (2014), cet outil est assez restrictif mais il est facilement applicable. Il est restrictif du fait qu'il prend en compte uniquement les interdépendances physiques entre les secteurs d'IC et les défaillances de type escalade. Aucune stratégie de résilience n'est applicable. Néanmoins, cet outil présente l'avantage d'utiliser comme données d'entrée uniquement des données économiques commerciales accessibles.

iii. Systèmes multi-agents

Les systèmes multi-agents (SMA) ont pour but de créer un monde artificiel composé d'agents en interaction dans un environnement commun. Les SMA « consistent à pouvoir étudier, concevoir et réaliser des univers ou des organisations d'agents artificiels (électroniques ou informatiques) capables d'agir, de collaborer à des tâches communes, de communiquer, de s'adapter, de se reproduire, de se représenter l'environnement dans lequel ils évoluent et de planifier leurs actions, pour répondre soit à des objectifs définis extrinsèquement (par un programmeur humain par exemple), soit intrinsèquement à partir d'un objet général de survie ».

La caractérisation des agents, des interactions et de l'environnement différencie les SMA. Il faut noter qu'il n'y a pas de contrôle global du SMA. Chaque agent a un point de vue partiel et donc une capacité de résolution de problèmes limitée. Les interactions existent à partir de la communication entre les agents. Ces derniers possèdent un comportement

autonome qui « peut être vu comme la conséquence de ses connaissances, de ses interactions avec d'autres agents et des buts qu'il poursuit » (Ferber, 1995). Ainsi, les agents possèdent les propriétés suivantes (d'après Hanachi *et al.*, 2014) :

- D'autonomie ;
- De réactivité à partir de la perception de l'environnement et sa réponse face aux changements dans le temps. Des règles sont alors mises en place afin de définir le comportement de l'agent à adopter ;
- De communication à partir des interactions avec les autres agents ;
- D'aptitude sociale car l'agent interagit avec d'autres agents de façon coopérative ou compétitive pour atteindre ses objectifs ;
- D'opportunisme car sur sa propre initiative, l'agent peut se fixer des buts pour atteindre ses objectifs ;
- D'apprentissage car l'agent peut mémoriser ses expériences et adapter son comportement en conséquence
- De mobilité car l'agent peut se déplacer et se dupliquer.

Plusieurs disciplines comme la physique, chimie, biologie, l'écologie utilisent les systèmes multi-agents afin d'expliquer et de prévoir les phénomènes naturels. Afin d'étudier les interactions entre les variables des agents, l'utilisation de relations mathématiques est possible (équations différentielles, matrice de transition,...) (Ferber, 1995). A partir de la mémoire et l'apprentissage de chaque agent, il est possible d'observer les effets d'auto-organisation et d'apparition de phénomènes émergents au sein du système (Ferber, 1995).

Les systèmes multi-agents sont également largement effectués pour analyser le comportement des interdépendances entre les IC. Cet outil est à la fois spécifique et possède un large choix d'application. En effet, il a la particularité d'utiliser l'approche bottom-up. Cela implique une description individuelle de chaque entité du système sans avoir une connaissance du comportement des autres entités. L'ensemble des types d'interdépendances et de défaillances sont prises en compte. Les propriétés des agents permettent également d'intégrer l'ensemble des stratégies de résilience. Toutefois, ses limites résident dans le nombre important de données d'entrée à fournir et dans la vitesse de simulation.

iv. Description dynamique des systèmes

La dynamique des systèmes étudie de manière temporelle les phénomènes qui réalisent un changement ou une conservation à l'intérieur d'un système. Elle est définie par son concepteur comme un « mode d'étude du comportement des systèmes industriels permettant de montrer comment des politiques, des décisions, des structures et des délais sont en interrelation pour influencer la croissance et la stabilité » (Forrester, 1961)

Cette technique de modélisation et simulation utilise différents éléments de base du modèle qui sont (d'après Provitolo, 2006) :

- Les variables de niveau ou d'état qui représentent des stocks dont la quantité varie dans le temps en fonctions des flux d'entrée et de sortie. Les stocks représentent aussi bien des accumulations matérielles (eau, individus,...) qu'immatérielles (les connaissances par exemple).
- Les flux ;
- Des variables auxiliaires qui sont utilisées afin d'intégrer de l'information qualitative et des délais dans les modèles.
- Le canal d'information qui connecte les variables du système et simule les rétroactions.

La démarche de construction en dynamique des systèmes peut être explicitée en cinq étapes (Garbolino *et al.*, 2010 d'après Forrester 1961). Dans un premier temps, la description de l'état des éléments en interaction est réalisée à partir du choix des variables. Puis, plusieurs hypothèses sont établies afin de caractériser les interactions. La troisième étape permet la construction du modèle de relations causales entre les variables à l'aide de la connaissance du système et des hypothèses. Les phénomènes de causalité peuvent ensuite être désagrégés afin de diminuer leur complexité et ainsi faciliter l'étude des conséquences. Enfin, l'écriture des relations causales sous forme d'équations différentielles constitue la dernière étape. Cette ultime étape favorise les simulations avec un outil informatique.

Cet outil est utilisé pour modéliser et simuler les interdépendances entre les IC. Au vu des critères de comparaisons, cet outil n'a pas de particularité ou de restriction distincte à ce type d'utilisation. Les interdépendances physiques et cybernétiques sont représentées. Le type de défaillance en cascade est pris en compte. Selon le nombre de relations mises en évidence entre les éléments du système identifiés, la quantité de données peut devenir importante et augmenter la durée de simulation.

v. Description outil à base de graphes

De manière générale, un graphe permet de représenter les relations d'un ensemble d'éléments connectés entre eux (Maquin, 2008). Un graphe $G = (N ; L)$ se définit par un ensemble fini de liens L et un ensemble fini de nœuds N . La théorie des graphes résout des problèmes impliquant des objets configurés en réseau. D'autre part, selon que l'on choisit d'orienter les arrêtes ou de leur attribuer un poids, les graphes sont appelés orientés ou pondérés (Maquin, 2008). La distance, les capacités de flux de personnes ou de matières sont des exemples de critères de pondération. L'utilisation de cet outil conduit à analyser structurellement la configuration du graphe afin d'apporter une meilleure compréhension du fonctionnement des réseaux (Lhomme, 2012). Des indicateurs mathématiques sont mis en place. Il s'agit d'étudier à la fois le réseau dans sa globalité (exemples : indice de connexité et connectivité) mais aussi les caractéristiques de chaque nœud (exemples : degré, centralité, accessibilité...). La dimension temporelle n'est alors pas prise en compte.

Du fait qu'il est possible de représenter les IC par un graphe, cet outil est pertinent notamment pour étudier la topologie des réseaux et donc des interdépendances physiques et cybernétiques. Son avantage réside dans l'étude structurelle de ces réseaux à partir des défaillances en cascade et en cause commune. La capacité d'absorption du réseau est alors analysée à partir de ses redondances éventuelles.

vi. Description réseaux de Pétri

Ce modèle mathématique permet de représenter les systèmes distribués discrets introduits par Pétri. Un réseau de Pétri est un graphe biparti comportant des éléments définis par des places et transitions afin de représenter la circulation d'objets et d'informations (Signoret, 2008). Ces derniers sont représentés par des jetons et se déplacent de place en place à différents pas de temps si les transitions sont valides. Le nombre de jetons présents dans la place est le marquage. La transition est validée notamment par des conditions de délais. Un nombre de jetons suffisants peut également être demandé pour réaliser une transition.

Les atouts des réseaux de Pétri sont principalement de (d'après Morère, 2002) :

- Décrire de manière précise la structure d'un système de manière non-formelle ;
- Mettre en place un support graphique de conception ;
- Décomposer les éléments constitutifs d'un système et les représenter ;
- Permettre de décrire la structure et la dynamique d'un système.

Les réseaux de Pétri sont notamment utilisés pour la modélisation des systèmes informatiques, la commande des ateliers de fabrication, la conception de systèmes temps réel, la modélisation des protocoles de communication. Cet outil est également utilisé pour modéliser dynamiquement des scénarios de risques d'un territoire (Brilhac *et al.*, 2009).

Les réseaux de pétri sont appliqués au cas des interdépendances de type physique entre les IC. A partir d'une simulation discrète, le comportement des IC est observé suite à des défaillances en cascade ou en cause commune. Cet outil a besoin d'une quantité moyenne de données d'entrée. La capacité d'absorption via des stocks ou des ressources alternatives sont des mesures de résilience applicables.

I-1.5.3 Apports et limites des travaux existants sur la gestion des risques des IC

Deux approches (prédictive et empirique) utilisent des outils d'analyse des interdépendances. L'approche empirique utilise une base de données. Les cinq outils principaux de l'approche prédictive (la dynamique des systèmes, système multi-agents, modèle non opérabilité entrée-sortie, réseau de Pétri, outils à base de graphes) ont été présentés et comparés. Cette comparaison met en évidence :

- L'opposition entre les systèmes multi-agents et le modèle de non-opérabilité entrée-sortie. Le premier présente un large champ d'application et de possibilités d'application car il prend en compte l'ensemble des types d'interdépendances, des types de défaillances et des stratégies de résilience. Au contraire, le second outil est plus restrictif. Son avantage réside par apport aux SMA en la faible quantité de données d'entrée nécessaire et en leur accessibilité ;
- Les autres outils ne présentent pas de spécificité ou de restriction marquante. Toutefois, leur utilisation permet de s'intéresser à différentes caractéristiques des IC : la topologie des réseaux par la théorie des graphes, les relations causales et boucles de rétroactions pour les systèmes dynamiques, l'évolution probabiliste ou déterministe pour les réseaux de pétri.

L'identification des données d'entrée nécessaires et du résultat souhaité sont deux critères essentiels pour choisir une méthodologie d'analyse des interdépendances entre IC. Ces critères sont abordés dans un cadre d'analyse de méthodologies sur les IC conçu par Griot (2010) mais ne font pas l'objet d'une application sur un ensemble de méthodologies. Or, ces informations pourraient approfondir les comparaisons des méthodologies existantes afin d'aider un potentiel acteur voulant initier une démarche d'analyse des interdépendances.

I-1.5.4 Travaux des IC sur la remise en service

Lhomme (2012) évoque des travaux complémentaires portant sur la modélisation de la remise en service et son optimisation sur les IC appelés réseaux techniques (eau potable, assainissement, électricité, gaz naturel, les communications, transports par route et ferroviaire, transports urbains,...).

Lhomme (2012) évoque trois types de modélisation pour la remise en service des IC réseaux : l'approche statistique, l'analyse des ressources, la simulation par événements discrets.

L'approche statistique a pour objectif principal d'évaluer le plus précisément possible le temps nécessaire à la remise en service des IC et les coûts induits par cette indisponibilité (Nojima *et al.*, 2001; Chang *et al.*, 1996; Shinozuka *et al.*, 1998 cité dans Lhomme, 2012). Des bases de données d'événements passés sont alors réalisées afin d'établir des courbes de remise en service. Un exemple d'objectif de ces courbes peut être d'établir des relations entre le nombre de jours d'indisponibilité du réseau et l'intensité des dommages. La limite de cette approche réside dans le fait que le fonctionnement des réseaux techniques et les contraintes spatiales ne sont pas pris en compte (Lhomme, 2012).

L'analyse des ressources se focalise au contraire sur les ressources disponibles comme le matériel et les employés afin de modéliser la remise en service à travers le temps et l'espace. Cette approche utilise des modèles mathématiques à base d'équations ou de règles (Tabucchi *et al.*, 2008 cité dans Lhomme, 2012). La limite de cette approche réside dans le fait qu'elle ne tient pas compte d'une estimation préalable des impacts (Tabucchi *et al.*, 2008 cité dans Lhomme, 2012).

La dernière approche se propose de simuler discrètement et dynamiquement la remise en service à partir d'une approche déterministe ou stochastique. Ces simulations demandent une connaissance approfondie des opérations de réparations (Cagnan *et al.*, 2004) et requièrent par conséquent un échange d'informations avec les opérateurs de réseaux afin de (Lhomme, 2012) :

- Connaître et localiser les ressources (hommes et matériels) disponibles ;
- Connaître les procédures de remise en service mises en place ;
- Connaître les ressources nécessaires pour chaque réparation ;
- Connaître l'efficacité des équipes.

La limite principale de cette dernière approche réside dans la complexité des informations demandées aux opérateurs (Lhomme, 2012).

Lhomme (2012) identifie trois problématiques à soulever pour optimiser la remise en service (d'après (Wang *et al.*, 2004; Nojima *et al.*, 1992; Xu *et al.*, 2007; Kozin *et al.*, 1991) :

- « Quelles infrastructures les gestionnaires doivent-ils prioritairement remettre en service ?
- Où et quand les gestionnaires doivent-ils précisément affecter leurs ressources

durant la crise ?

- Où les gestionnaires doivent-ils placer leurs dépôts ? Est-il de surcroît nécessaire de créer de nouveaux dépôts ? »

La réponse à la première question se fait en deux temps. D'une part il faut identifier les infrastructures prioritaires à remettre en service car elles sont susceptibles d'impacter un nombre important d'utilisateurs. Puis, il faut organiser les réparations de manière optimale au cours du temps (Nojima *et al.*, 1992 cité dans Lhomme, 2012).

Les réponses à la seconde question permettent à la fois de répondre à la première problématique mais également de se concentrer sur la réparation des ressources dans le temps suite à l'évènement en tenant compte des ressources disponibles (Xu *et al.*, 2007; Kozin *et al.*, 1991 cité dans Lhomme, 2012). Cette approche utilise une modélisation dynamique (simulations par événements discrets ou processus de Markov) de la remise en service à partir de l'évaluation des impacts en termes de coûts ou d'utilisateurs affectés. Des fonctions sont introduites pour minimiser les coûts ou les utilisateurs impactés à partir des contraintes sur les ressources disponibles.

L'établissement de modèle de localisation-allocation est la réponse à la troisième problématique (Wang *et al.*, 2004 cité dans Lhomme, 2012). Cette approche cherche à identifier la localisation optimale des dépôts utilisés en cas de crise. La dimension économique du coût de transport entre les dépôts et les IC à remettre en service peut être prise en compte.

La principale limite de ces deux approches porte sur la non prise en compte des interdépendances pendant cette période de remise en service. Ces travaux présentent une vision sectorielle de la remise en service des IC sans s'intéresser aux impacts éventuels sur les autres IC.

I-1.6. Synthèse

Dans ce premier chapitre, le territoire et les infrastructures critiques ont été présentés dans un contexte de gestion des risques et des crises.

Dans un premier temps, il a été démontré que le territoire est un système complexe à partir de l'identification de ses caractéristiques et l'étude de son organisation pour la gestion des risques et des crises.

Les définitions pluridisciplinaires du territoire ont fait émerger trois caractéristiques : l'espace géographique, la population et les finalités de celui-ci. Il a été noté la nécessité de prendre en compte l'interaction entre l'espace géographique et la population. Ces deux éléments s'organisent afin de donner un sens et une finalité au territoire. En France, l'organisation pour faire face aux risques et aux crises est notamment établie par la gouvernance des territoires aux échelles nationale, zonale, départementale et communale et vise à prendre des mesures réglementaires afin de diminuer la vulnérabilité et accroître la résilience de ces systèmes. A ce titre, nous retiendrons que la vulnérabilité s'intéresse à l'endommagement des enjeux face à un événement alors que la résilience traite les questions de récupération fonctionnelle (Lhomme *et al.*, 2010). L'étude de la vulnérabilité du territoire évoque la prise en compte de différents facteurs comme celui de dépendance entre les différents enjeux du territoire et de spatialité de ces derniers. Le facteur de dépendance permet de prendre en compte les interactions entre les différents enjeux du territoire. D'autre part, la résilience est examinée à partir de ses différentes capacités. On peut distinguer la résilience proactive et post active qui ont lieu respectivement avant et après la crise et mettent en œuvre les capacités adaptatives et d'apprentissage du système. La résilience réactive apparaît quant à elle pendant la crise en impliquant les capacités de résistance/d'absorption, d'auto-organisation et de réponse collective des enjeux. Il s'agit alors de la résilience de temps court. L'établissement des capacités de résilience s'effectue en tenant compte de la dimension temporelle par rapport à l'évènement. La dimension spatiale apparaît dans la capacité de réponse collective de la résilience de temps court en étudiant la remise en service des enjeux à partir de leur accessibilité.

Le second temps du chapitre présente les caractéristiques des systèmes d'infrastructures critiques afin de montrer leur complexité et hétérogénéité. La description de ces composants du territoire est appréhendée par les approches systémique et spatiale. Les systèmes d'IC sont alors détaillés par l'étude du fonctionnement de leurs composants, des interactions et de leur environnement.

Les infrastructures critiques sont identifiées mais ne correspondent pas à une typologie unique car chaque pays ou organisation établit sa propre liste. Plusieurs modes de fonctionnement (exploitation, arrêt, maintenance,...) influencent le comportement des IC. Cela entraîne une variation des services essentiels. Les interactions sont décrites par les quatre types d'interdépendances (physiques, cybernétiques, géographiques et logiques), le couplage entre IC et les types de défaillances rencontrés. L'environnement des systèmes techniques d'infrastructures critiques est précisé par le contexte économique, social, politique et réglementaire. Le contexte social met en avant le rôle essentiel de la population du territoire. Cette dernière est à la fois des usagers des services essentiels mais aussi du personnel de ces IC.

L'approche spatiale apporte la localisation des infrastructures critiques et des interdépendances, la direction des flux, les zones spatiales des services essentiels desservis et les limites avec l'environnement des systèmes d'IC.

Le dernier temps du chapitre se concentre sur les travaux méthodologiques de gestion des risques et des crises des infrastructures critiques à partir de la littérature.

Les travaux portant sur la gestion des risques sont soit relatifs à l'étude de chaque IC soit portent sur l'étude du comportement d'IC interdépendantes (Yusta *et al.*, 2011). Cette seconde orientation met en avant deux approches complémentaires : empirique et prédictive. Elles utilisent des bases de données pour la première approche et des outils de modélisation et simulation pour la seconde. Une étude comparative de cinq outils de modélisation et simulation est proposée à partir de deux états de l'art de la littérature. Il ressort que les SMA sont un outil couvrant un large spectre de critères mais demande une quantité de données importantes et peu accessibles. A contrario, le modèle non opérabilité entrée-sortie est restrictif en termes de possibilités d'application mais la quantité de données d'entrée nécessaire est faible et accessible. Les autres outils ne présentent pas de restrictions particulières ou de spécificités fortes.

Enfin, les travaux de remise en service des réseaux dits techniques sont identifiés selon deux approches complémentaires : la modélisation et l'optimisation de remise en service. Différents avantages et inconvénients sont distingués selon la prise en compte des impacts des IC, la quantité et localisation des ressources disponibles et nécessaires mais également selon le coût des réparations. La principale limite de ces deux approches porte sur le fait qu'elles ne tiennent pas compte des interdépendances entre les IC durant la remise en service.

Les propos bibliographiques tenus lors de ce premier chapitre sur les études des interdépendances entre IC suite à un événement ne permettent pas d'identifier un outil ou une méthodologie correspondant à la problématique du projet. Une analyse plus approfondie des données d'entrée et des résultats est nécessaire. La prise en compte des dimensions de ces informations (technique, organisationnelle, économique, sociale, institutionnelle, spatiale) est également un élément intéressant à connaître afin de percevoir l'aspect multidimensionnel des IC. Le second chapitre propose un nouveau traitement de trente-six méthodologies afin de combler ces manques.

I-2. Etude des méthodologies d'analyse des interdépendances entre infrastructures critiques

Le chapitre précédent a mis en évidence des limites concernant les données et les résultats des outils d'analyse des interdépendances entre les IC et des méthodologies de gestion des risques et des crises des IC. Il est alors difficile d'identifier une méthodologie ou un outil d'analyse des interdépendances entre IC pour un utilisateur souhaitant étudier le comportement du territoire composé d'IC. Face à ces manques, ce chapitre étudie trente-six méthodologies d'analyse des interdépendances des IC à partir des informations multidimensionnelles des données d'entrée et des résultats. Pour cela, un cadre d'analyse structuré en deux phases est tout d'abord présenté. Les objectifs, les outils d'analyse des interdépendances, les secteurs d'activités et les échelles d'application appliqués dans les méthodologies sont identifiés. Puis, les données d'entrée et les résultats possibles des travaux méthodologiques sont établis à partir d'un formalisme multidimensionnel. Ces informations sont ensuite appliquées aux trente-six méthodologies.

I-2.1. Présentation des méthodologies

Lors du chapitre précédent, plusieurs critères d'étude ont été identifiés afin de comparer les différentes méthodologies et outils d'analyse des interdépendances entre infrastructures critiques.

Dans cette partie, trente-six méthodologies (Tableau 5) sont étudiées au travers d'un prisme différent permettant de faciliter le choix d'une méthode ou d'un outil au regard des données d'entrée, des objectifs fixés et des résultats attendus (Figure 11).

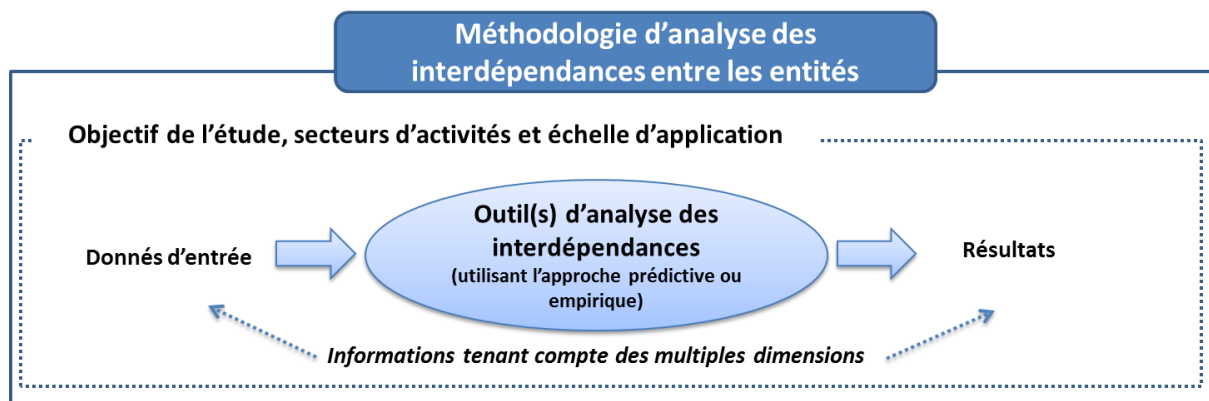


Figure 11 : Cadre d'analyse d'une méthodologie étudiant le comportement des IC interdépendantes

	Noms des travaux	Références	Objectifs des travaux
1	Guide méthodologique 'Réduire la vulnérabilité des infrastructures essentielles' développé par le Centre Risque&Performance	(Robert <i>et al.</i> , 2009)	Mise en place d'une démarche méthodologique et collaborative entre plusieurs opérateurs/gestionnaires dans le but d'évaluer les interdépendances entre les infrastructures essentielles à partir de courbes d'effets dominos sur des secteurs géographiques précis
2	Approche proposée par Jonas Johansson et Henrik Hassel	(Johansson 2010; Johansson <i>et al.</i> , 2010)	Proposition d'une approche de modélisation et simulation établie à partir de la théorie des graphes prenant en compte les propriétés structurelles et fonctionnelles des infrastructures techniques afin d'étudier leur vulnérabilité spécifique et globale
3*	Travaux empiriques menés par Zimmerman	(Zimmerman 2004; Zimmerman <i>et al.</i> , 2006)	Caractérisation à l'aide d'indicateurs de conséquences une base de données sur les interdépendances entre infrastructures critiques
4	Critical Infrastructure Modeling System (CIMS)	(Dudenhoeffer <i>et al.</i> , 2006)	Développement d'un outil de modélisation (à partir d'une visualisation en 3D de la zone d'étude) et de simulation appelé CIMS afin d'analyser les interdépendances entre infrastructures critiques
5	CommoAspen	(Barton <i>et al.</i> , 2004)	Développement d'un modèle basé agents évaluant les impacts financiers de la défaillance des infrastructures de télécommunications sur d'autres infrastructures critiques
6	N-ABLE	(Schoenwald <i>et al.</i> , 2004; Barton <i>et al.</i> , 2004)	Développement d'un modèle économique basé agents pour modéliser et simuler les décisions incluant l'achat de produits, l'embauche de travailleurs, la vente de bonds et d'autres. La méthodologie est utilisée également pour évaluer l'interruption du transport ferroviaire et de l'électricité sur la production de produits
7	Modélisation à haut niveau d'abstraction des interdépendances entre le réseau d'électricité et des télécommunications	(Delamare <i>et al.</i> , 2009)	Développement d'un modèle et d'un algorithme de simulation décrivant la topologie des réseaux d'électricité et des télécommunications et suivant la reconfiguration des routeurs suite à des défaillances électriques
8*	Travaux empiriques menés par McDaniel	(McDaniels <i>et al.</i> , 2007)	Développement d'un cadre empirique sur les défaillances entre infrastructures interdépendantes et étude des indicateurs de conséquences
9	M&S Methods, "System-of-systems" approach for interdependent critical infrastructure	(Eusgeld <i>et al.</i> , 2011; Eusgeld <i>et al.</i> , 2009)	Développer une approche combinant les systèmes multi-agents et "high level architecture" afin d'étudier les interdépendances entre infrastructures critiques (électricité, gaz, SCADA) à plusieurs niveaux d'abstraction suite à une défaillance

10	Modeling the Demand Reduction Input-Output (I-O) Inoperability Due to Terrorism of Interconnected Infrastructures	(Santos <i>et al.</i> , 2004)	Utilisation du modèle non-opérabilité entrée-sortie à l'échelle nationale et régionale pour décrire l'impact d'un événement terroriste à des secteurs d'infrastructures interconnectés
11	Inoperability Input-Output Modeling of Disruptions to Interdependent Economic Systems	(Santos, 2006)	Développement d'un modèle non-opérabilité entrée-sortie pour décrire l'impact fonctionnel et économique d'un événement et intégration d'une démarche multi critères pour fusionner les pertes fonctionnelles et économiques et de multiplicateurs dynamiques afin d'évaluer les pertes sur plusieurs années
12	Critical infrastructure dependency assessment using the input-output inoperability model	(Setola <i>et al.</i> , 2009)	Analyse des effets cascades induits par les dépendances entre secteurs d'infrastructures critiques à partir d'un modèle de non-opérabilité entrée-sortie et de l'estimation de ses paramètres à l'aide d'avis d'expert/logique floue
13	Development of the multiregional inoperability input-output model for spatial explicitness in preparedness of interdependent regions	(Crowther, 2010)	Mise en place d'un cadre d'étude multirégional pour étudier l'impact fonctionnel et économique d'un événement à des systèmes d'infrastructures interconnectés à partir du modèle de non-opérabilité entrée-sortie
14	Agent-based input-output interdependency model	(Oliva <i>et al.</i> , 2010)	Développement d'un modèle couplant un modèle multi-agent et un modèle de non-opérabilité afin d'étudier les infrastructures critiques et leurs secteurs à plusieurs niveaux d'abstraction et surmonter les limites de chaque outil
15	Economic impact assessment of Critical Infrastructure failure in the EU: A combined Systems Engineering - Inoperability Input-Output Model	(Jonkeren <i>et al.</i> , 2012)	Développement d'un outil couplant un modèle non-opérabilité entrée-sortie et l'ingénierie système afin d'étudier les pertes fonctionnelles et économiques à l'échelle nationale et régionale suite à une perturbation sur des secteurs d'infrastructures critiques interdépendantes
16	MIN	(Zhang <i>et al.</i> , 2003)	Développement d'une méthodologie à partir d'un modèle basé agents afin d'équilibrer les flux et optimiser les ressources financières entre plusieurs réseaux d'infrastructures
17	CIPDSS	(Santella <i>et al.</i> , 2009; Conrad <i>et al.</i> , 2006)	Développement d'une approche de modélisation et simulation des interdépendances entre les infrastructures critiques et les systèmes d'infrastructures critiques à partir de la dynamique des systèmes

18	An approach to design interface topologies across interdependent urban infrastructure systems	(Ouyang <i>et al.</i> , 2011)	Présentation d'une approche de modernisation de la topologie des systèmes d'infrastructures urbains pour minimiser les pannes en cascade
19	AIMS	(Bagheri <i>et al.</i> , 2007)	Développement d'un modèle basé agents afin de comprendre le comportement fonctionnelle et économique des interdépendances entre les infrastructures critiques
20	An impact-based approach for the analysis of cascading effects in critical infrastructures	(Franchina <i>et al.</i> , 2011)	Développement d'un outil "carte d'effet domino" pour prendre en compte les effets cascades des interdépendances entre infrastructures critiques
21	Dynamic functional modelling of vulnerability and interoperability of Critical Infrastructures	(Trucco <i>et al.</i> , 2012)	Développement d'un outil de modélisation et simulation (algorithme de simulation) pour modéliser les interdépendances entre les infrastructures critiques de transport à l'échelle régionale
22	La sécurisation des infrastructures critiques : recherche d'une méthodologie d'identification des vulnérabilités et modélisation des interdépendances	(Rozel, 2009)	Développement d'un outil de modélisation et simulation des réseaux électriques et des communications électroniques dans le but de sécuriser le réseau électrique aux défaillances en cascades
23*	Identification of sources of failures and their propagation in critical infrastructures from 12 years of public failure reports	(Rahman <i>et al.</i> , 2009)	Développement d'une base de données afin d'identifier l'origine des défaillances et leur impact sur les infrastructures des TIC et d'autres dimensions sur l'ensemble des infrastructures critiques
24	Toward modeling and simulation of critical national infrastructure interdependencies	(Min <i>et al.</i> 2005)	Développement d'un couplage d'outils (dynamique des systèmes, modèle fonctionnel et algorithme d'optimisation non-linéaire) afin de modéliser et simuler les interdépendances entre infrastructures critiques
25	Input-Output impact risk propagation in critical infrastructure interdependency	(Owusu <i>et al.</i> , 2010)	A partir de la matrice de Leontief, développement d'une méthode d'évaluation des interdépendances entre infrastructures critiques à partir de coefficients de vulnérabilité
26	TRANSMIS	(Toroczkai <i>et al.</i> , 2005)	Développement d'une méthode à base d'agents pour modéliser les interdépendances entre les réseaux dans un cadre urbain
27	Dynamic recovery of critical infrastructures : real-time temporal coordination /I2SIM	(Hollman <i>et al.</i> 2007)	Développement d'un outil de modélisation et simulation multi-échelle des interdépendances entre infrastructures critiques suite à une défaillance afin d'optimiser le temps et les quantités de ressources pour les personnes sinistrées

28	DECRIS Project	(Utne <i>et al.</i> , 2011; Utne <i>et al.</i> , 2008)	Développement d'une approche innovante d'évaluation des conséquences d'un évènement sur des IC interdépendantes à partir d'arbre de scénarios
29	CISIA	(De Porcellinis <i>et al.</i> , 2009; De Porcellinis <i>et al.</i> , 2008; Panzieri <i>et al.</i> , 2005)	Développement d'un outil basé agents afin de simuler à court terme une défaillance sur des infrastructures critiques interdépendantes à partir de l'acquisition de données incertaines des opérateurs/gestionnaires (utilisation de la logique floue)
30	NSRAM : Network Security Risk Assessment Modeling	(Mcmanus <i>et al.</i> 2004)	Construction d'un outil modélisant plusieurs infrastructures interdépendantes en tenant compte notamment des éléments de réparations (temps à restaurer, coût, priorités de réparation,...)
31	NEMO	(Goodwin <i>et al.</i> , 2005)	Développement d'une approche pour modéliser les interdépendances entre infrastructures critiques afin d'évaluer les conséquences fonctionnelles en cas de défaillances et définir les mesures associées pour les réduire
32	Decentralized risk management for strategic preparedness of critical infrastructure through decomposition of the inoperability input–output model	(Crowther, 2008)	Utilisation du modèle d'opérabilité entrée-sortie pour formuler des propositions d'aide à la décision concernant les stratégies de management des risques sur les interdépendances entre les infrastructures critiques
33	Modelling Interdependencies between the Electricity and Information Infrastructures	(Laprie <i>et al.</i> , 2007)	Modélisation et simulation d'une ou plusieurs défaillances sur les réseaux d'électricité et des télécommunications
34	Assessing uncertainty in extreme events: Applications to risk-based decision making in interdependent infrastructure sectors /EE-USIM	(Barker <i>et al.</i> , 2009)	Utilisation des résultats d'une méthode d'évaluation des impacts d'un évènement extrême au modèle non-opérabilité entrée-sortie afin d'identifier les pertes économiques potentielles sur les secteurs d'infrastructures interdépendants
35	Modeling and simulation of a service system in a disaster to assess its resilience	(Kanno <i>et al.</i> 2014)	Développement d'une méthode pour améliorer la résilience d'un service de santé suite à une catastrophe à partir de l'étude de la restauration des réseaux critiques et des activités de service
36*	Empirical findings on critical infrastructure dependencies in Europe	(Luijckx <i>et al.</i> , 2008)	Etude d'une base de données pour la compréhension des effets cascades entre les infrastructures critiques à partir d'indicateurs de conséquences

Tableau 5 : Méthodologies des interdépendances entre IC étudiées

Le cadre d'analyse s'intéresse aux objectifs, aux secteurs d'activités et échelle d'application traités par les méthodologies. Une distinction est faite entre les méthodologies empiriques, au nombre de quatre (identifiées dans le Tableau 5 par le symbole *), et les trente-deux travaux prédictifs. Par ailleurs, l'intérêt de se focaliser sur ces critères est également de décrire de manière quantitative les aspects intersectoriels et multi-échelles des travaux étudiés en lien avec les outils d'analyse utilisés. Les couplages préférentiels entre les différents secteurs d'activités et les applications à plusieurs étendues géographiques des différentes méthodologies seront alors connues.

Puis, les données d'entrée et les résultats des outils sont caractérisés au moyen de cinq dimensions : spatiale, sociale, institutionnelle, technique, économique. Ces informations sont ensuite appliquées :

- aux données d'entrée et résultats des méthodologies empiriques ;
- aux outils d'analyse des interdépendances et aux méthodologies prédictives. Toutefois du fait de la quantité importante de données d'entrée que l'on peut trouver, sept catégories sont mises en évidence. L'intérêt de cette analyse est de tirer des enseignements sur l'intégration des mesures de résilience qui peuvent être réalisées au sein des IC ainsi que sur la prise en compte des différents types d'interdépendance et de défaillance. Ces enseignements seront de nature quantitative et indiqueront comment sont intégrés ces informations.

I-2.3. Identification des outils d'analyse des interdépendances entre infrastructures critiques

Les méthodologies empiriques ([3], [8], [23] et [36]) utilisent une ou plusieurs bases de données pour analyser les interdépendances (encadré en noir sur la Figure 12).

Les méthodologies prédictives se basent sur sept outils d'analyse des interdépendances différents (Figure 12 ; annexe1a) : systèmes multi-agents, la dynamique des systèmes, outil à base de graphes, le modèle non-opérabilité entrée-sortie, les réseaux de Petri. Le formalisme de modélisation et simulation ad-hoc (modèle et algorithme de simulation formulés par les concepteurs) et les courbes/arbres. Les deux derniers outils n'étaient pas présents dans les travaux de Ouyang (2014) et Eusgeld *et al.* (2008). L'outil courbe/arbre s'appuie sur informations sur les interdépendances entre infrastructures critiques et représente les résultats sous forme de courbes ou arbres. Dans le cas de [1], il s'agit de courbes qui affichent la dépendance des IC face à la perte d'une ressource sur un secteur géographique donné et dans le temps. Par exemple, cette courbe illustre pendant combien de temps les infrastructures critiques d'eau potable ou de gaz naturel peuvent fonctionner sans électricité dans un secteur géographique donné. Les méthodologies [20], [25] et [28] modélisent les événements en cascade pouvant survenir sur les IC à partir d'une représentation sous forme d'arbres ou séquences.

D'autre part, une même méthodologie peut utiliser un ou plusieurs des sept outils. C'est le cas de la méthodologie [14] qui couple les outils de simulation des systèmes multi-agent et le modèle de non-opérabilité entrée-sortie. Elle sera classée dans la catégorie de l'outil modèle non-opérabilité entrée-sortie car les résultats de la simulation des systèmes multi-agent sont utilisés comme données d'entrée de cet outil.

La Figure 12 recense le nombre d'applications des sept outils d'analyse des interdépendances dans les trente-deux travaux prédictifs. Onze méthodologies utilisent la simulation des systèmes multi-agents ce qui démontre son attractivité ([4], [5], [6], [9], [16], [19], [26], [29], [30], [31], [35]). Le modèle non-opérabilité entrée-sortie est recensé 8 fois ([10] à [15], [32], [34]). Quatre travaux méthodologiques mettent en place un algorithme de modélisation et simulation ad-hoc ([7], [21], [22] et [27]) et quatre utilisent l'outil courbes/arbres ([1], [20], [25], [28]). L'outil à base de graphes ([2] et [18]) et la dynamique des systèmes ([17] et [24]) sont chacun dénombré deux fois. Les réseaux de Petri sont utilisés une seule fois.

Par ailleurs, ces outils s'appuient sur d'autres outils dits secondaires afin de combler des difficultés ou limites. C'est le cas de la simulation des systèmes multi-agents dans les méthodologies [4], [6], [16], [35] et de la dynamique des systèmes [24] qui s'appuient sur des algorithmes d'optimisation. Cette association d'outils a pour but d'optimiser les résultats finaux à partir de la multiplication des scénarios étudiés. La logique floue est également utilisée afin de tenir compte de l'incertitude des valeurs données par les experts. C'est le cas avec le modèle non-opérabilité entrée sortie dans [12] et la simulation des systèmes multi-agents dans [29]. L'analyse multicritère est appliquée dans la méthodologie [11] afin d'intégrer des poids dans les pertes fonctionnelles et économiques estimées par les scénarios du modèle non opérabilité entrée-sortie.

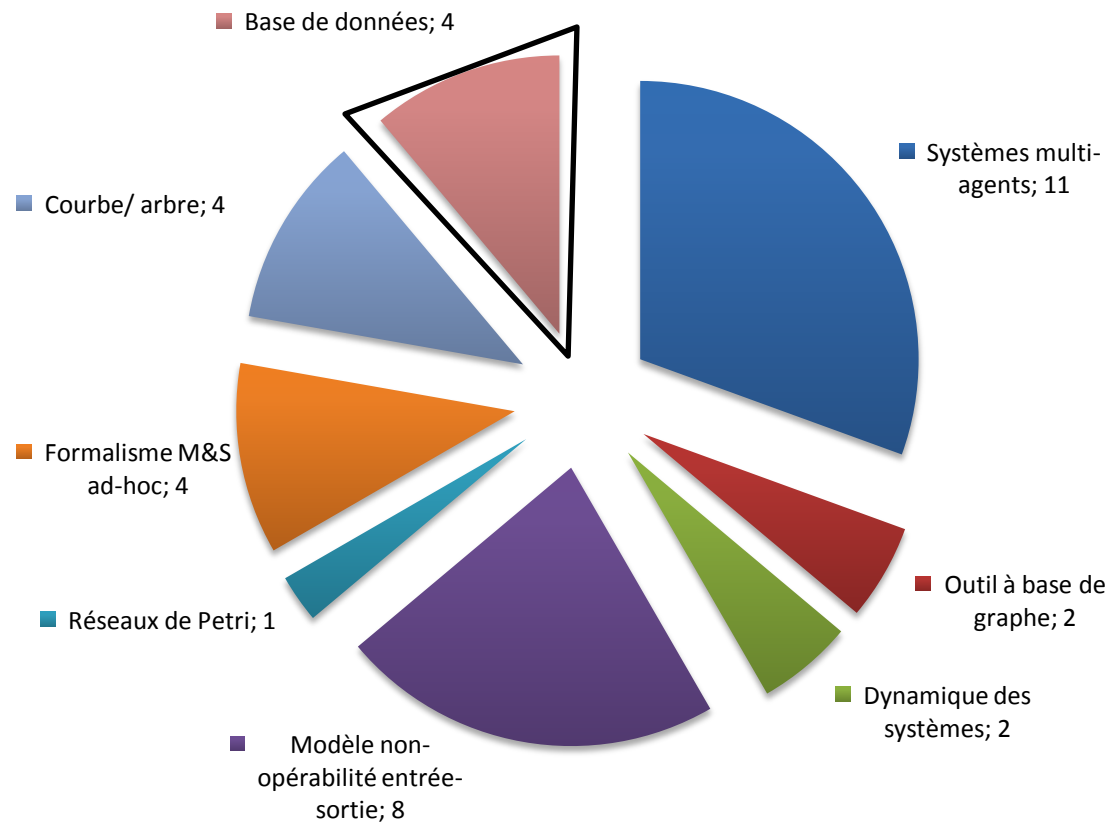


Figure 12 : Utilisation des outils d'analyse des interdépendances dans les méthodologies

I-2.4. Secteurs d'activités et échelles d'application

Cette partie établit des orientations générales des méthodologies d'analyses des interdépendances à partir de l'examen des secteurs d'activités et des échelles d'application. Ces informations sont à la fois analysées séparément mais aussi associées aux huit outils d'analyse des interdépendances cités précédemment.

I-2.4.1 Etude des secteurs d'activités

i. Secteurs d'activités les plus couramment étudiés

Afin d'identifier les secteurs d'activités qui ont fait l'objet d'études, les méthodologies sont analysées sur la base de la classification de Bouchon (2011) : énergie, communications, eau, alimentation, santé, finance, transport, industrie, domaine spatial, recherche, gouvernement, médias, poste, les monuments et icônes.

Le secteur d'activité 'industrie' doit être considéré de façon particulière en raison du fait qu'il existe des secteurs comme l'alimentation ou la santé qui possèdent leur propre industrie. Dans le cas de cette revue de littérature, le choix a été fait de laisser ces types d'industrie dans leur propre secteur. D'autre part, il est possible de décomposer les secteurs en plusieurs sous-secteurs afin de préciser le domaine d'application des travaux. Ainsi,

- L'Énergie est décomposée en électricité, gaz naturel, produits finis du pétrole. Le cas du nucléaire n'est pas abordé de manière spécifique. Il est cependant pris en compte dans le cas de la production d'électricité par les centrales nucléaires ;
- Le Transport se distingue en quatre mode : routier, ferroviaire, aérien et maritime/ fluviale ;
- Les activités de l'état sont segmentées en maintien de l'ordre, services de secours et autres fonctions occupées par les ministères.

Dans la suite de cette revue de la littérature, les secteurs d'activités non détaillés seront considérés comme étant des sous-secteurs d'activités.

La Figure 13 illustre le nombre de méthodologies traitant d'un sous-secteur d'activités particulier. La prise en compte des interdépendances est illustrée par le nombre de méthodologies appliquant des sous-secteurs d'activités possédant des réseaux indépendants comme l'électricité (recensé 29 fois), du gaz naturel (17 fois), des communications (25 fois), l'eau (19 fois) ou encore le transport par voie routière (20 fois). Ces sous-secteurs d'activités dépendent mutuellement et s'influencent les uns des autres. Une attention très forte est donc portée à l'électricité et aux communications. Par ailleurs, les sous-secteurs d'activités comme l'alimentation ou la santé possèdent des installations ou établissements (exemples : usines de production pharmaceutique, dépôts des produits pharmaceutiques) et sont dépendants des modes de transport pour déplacer les produits. Ils sont peu considérés dans les méthodologies (moins de quinze fois). C'est également le cas des sous-secteurs d'activités recherche et domaine spatial, maintien de l'ordre, services de secours, autres activités du gouvernement, média, poste, monuments et icônes qui n'influencent pas directement les autres sous-secteurs d'activités.

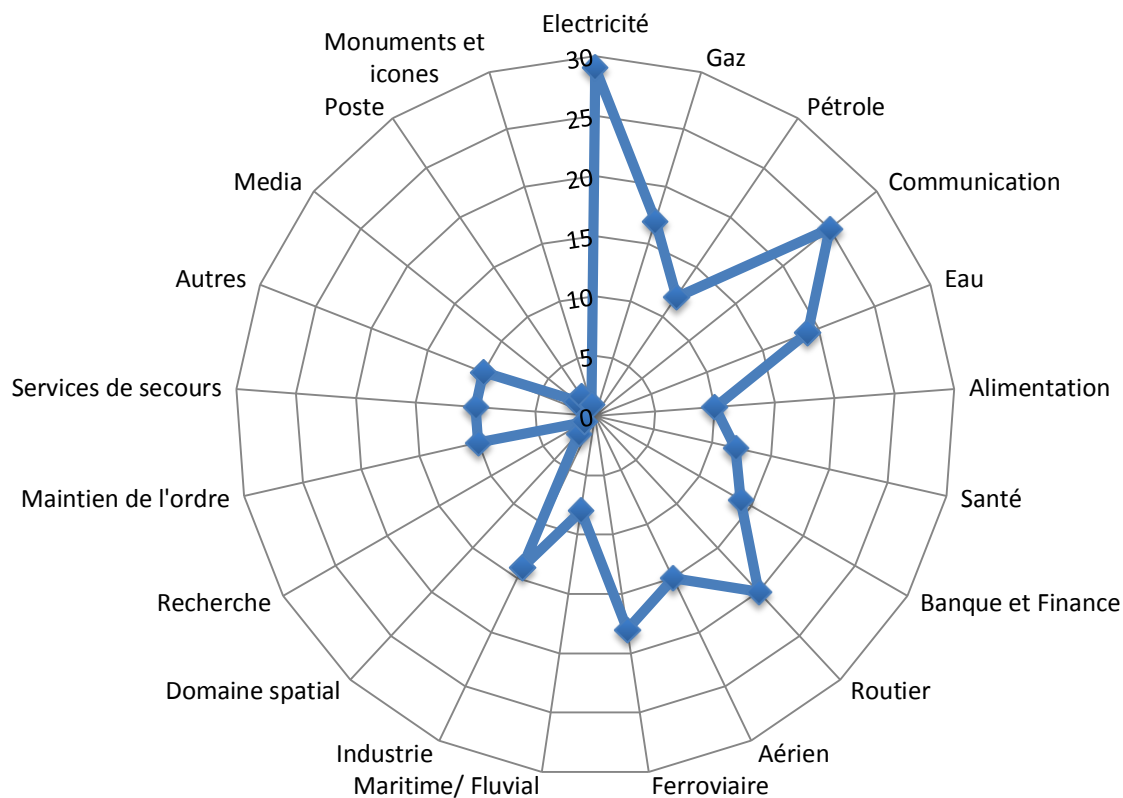


Figure 13 : Radar des sous-secteurs activités étudiés dans les méthodologies

Dans le même temps, la Figure 14 permet d'estimer le nombre de méthodologies qui sont appliquées à plusieurs sous-secteurs d'activités. Douze méthodologies permettent d'avoir une approche clairement multisectorielle.

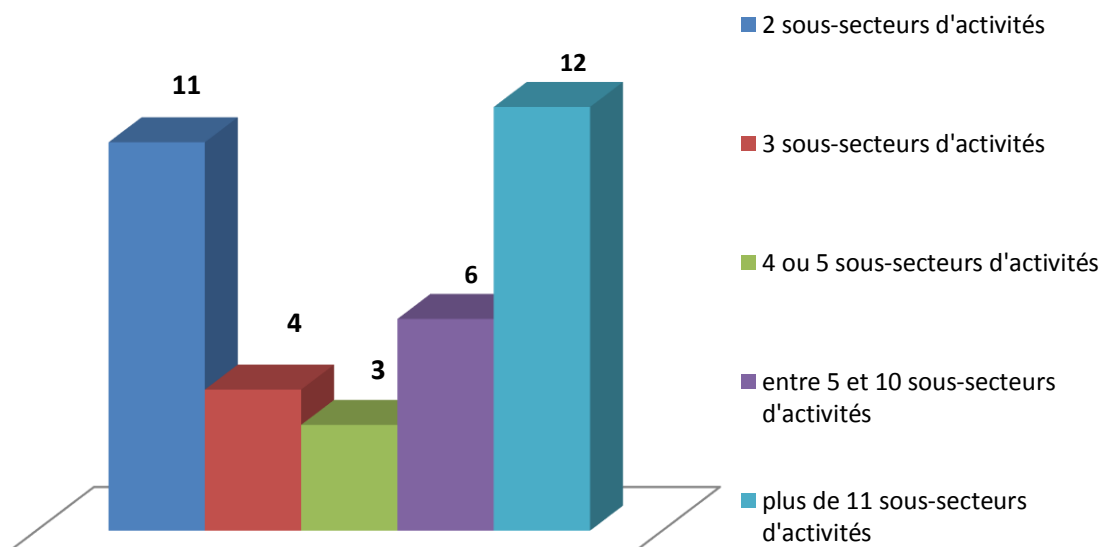


Figure 14 : Nombre de sous-secteurs d'activités appliqués dans les méthodologies

ii. Méthodologies intersectorielles

La Figure 15 décrit le pourcentage qu'un sous-secteur d'activité appliqué dans les méthodologies est associé à un autre sous-secteur d'activité. L'association des sous-secteurs d'activités avec uniquement l'électricité, le gaz naturel, le pétrole, les communications, l'eau, le transport par les voies routières et ferroviaires est étudiée. Les transports par le mode aérien ou fluvial, les médias, poste, recherche, domaine spatial, maintien de l'ordre, services de secours, autres activités du gouvernement monuments et icônes ne sont pas associés à cette description du fait de leur faible nombre d'apparition dans les méthodologies. La forte association de l'électricité (plus de 79 % des cas) et des communications (plus de 79% des cas). Cela traduit l'importance accordée à ces deux sous-secteurs d'activités dans les méthodologies. Il convient également de souligner que ces deux sous-secteurs d'activités font l'objet d'études spécifiques dans [7], [19], [22] et [25] du fait de leur dépendance mutuelle. L'électricité est associée dans 79% des cas aux communications tandis qu'à l'inverse ces sous-secteurs sont liés dans 92% des cas.

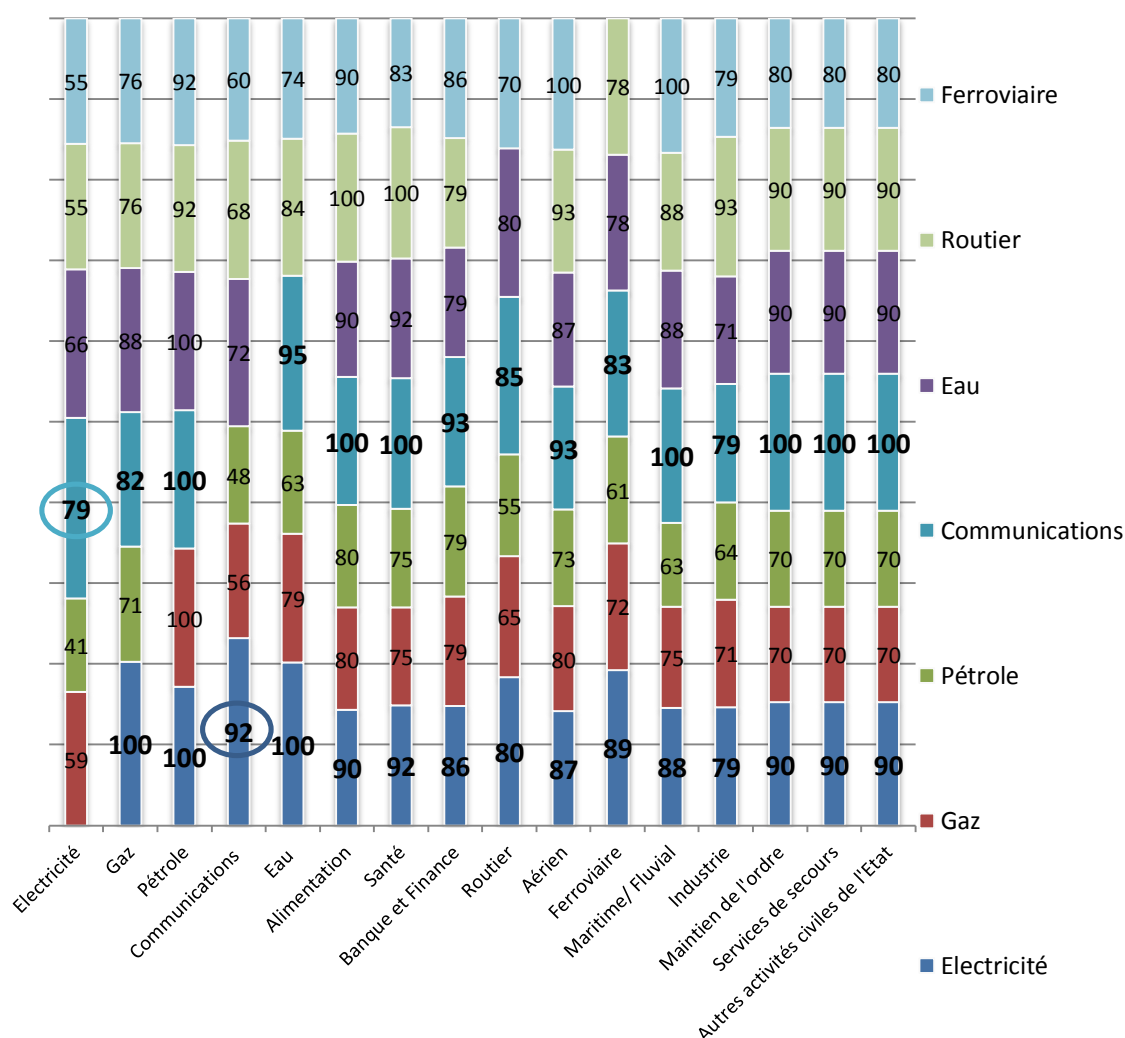


Figure 15: Pourcentage d'association entre un sous-secteur d'activités appliqué dans les méthodologies avec les autres sous-secteurs d'activités

iii. Outils d'analyse des interdépendances pour chaque sous-secteur d'activité

La Figure 16 présente pour chaque sous-secteur d'activités, la récurrence des outils utilisés. Le modèle non-opérabilité entrée-sortie et la base de données (valeurs encadrées en noir sur la Figure 16) sont les outils qui prennent en compte le plus de secteurs d'activités dans les méthodologies. Cette analyse montre tout d'abord qu'un nombre important de sous-secteurs d'activités ont été impactés par les événements passés (outil bases de données) ou que les données économiques délivrées par les instituts statistiques sont aisément accessibles (cas du modèle non-opérabilité entrée-sortie). Les sous-secteurs d'activités étudiés par l'outil à base de graphes (électricité, ferroviaire, communications et gaz naturel) sont ceux comportant des réseaux techniques. Cela traduit bien l'avantage de cet outil de se focaliser sur la topologie des réseaux. L'ensemble des méthodologies utilisant l'outil courbe/arbre prennent en compte l'électricité, les communications, l'eau et le transport routier (quatre fois) démontrant ainsi leur application multisectorielle. Les systèmes multi-agents ont été appliquée huit fois l'électricité, quatre fois par les communications et trois fois par l'eau, l'industrie et le transport routier. Cela démontre la puissance et la polyvalence de cet outil.

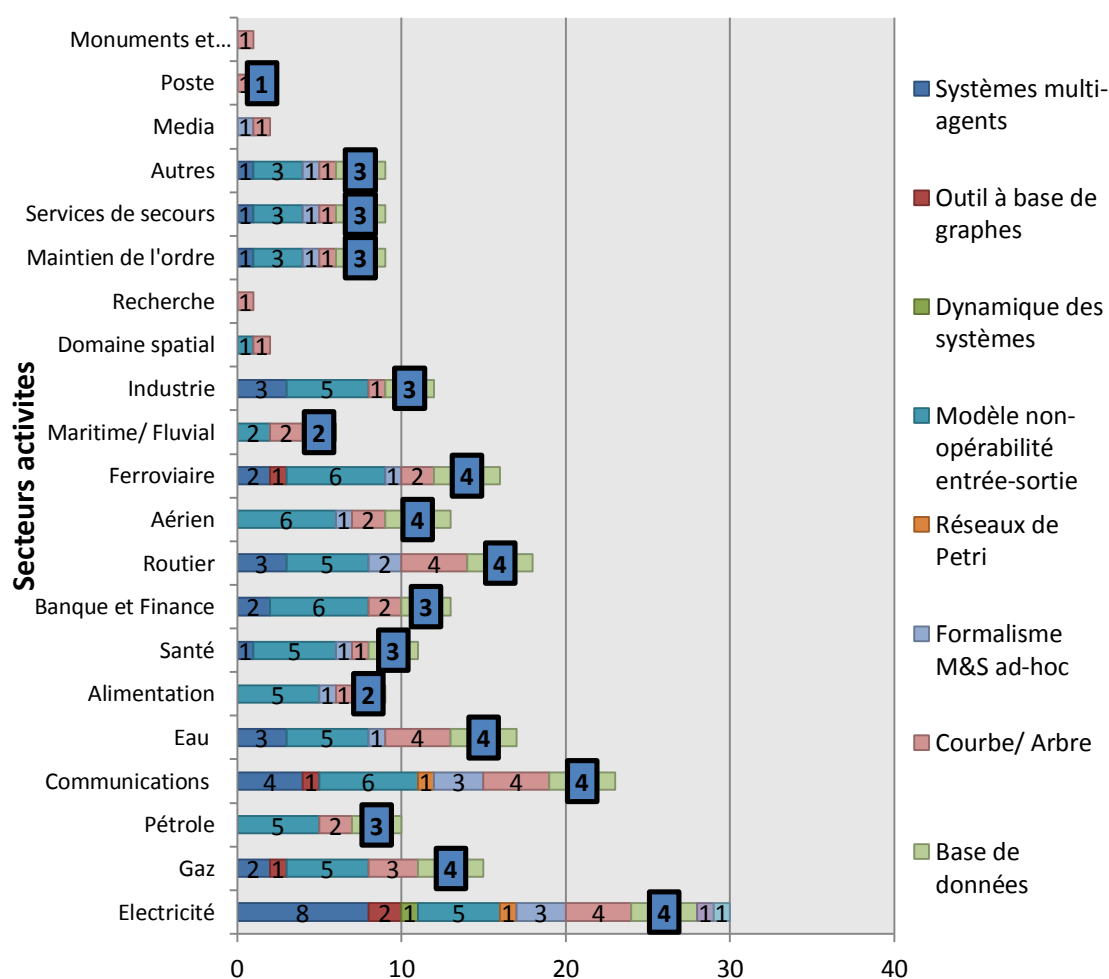


Figure 16 : Application des sous-secteurs d'activités pour les huit outils d'analyse des interdépendances

I-2.4.2 Echelles d'application

i. Quatre échelles possibles

Les différents acteurs de protection des infrastructures critiques et l'étendue des services délivrés par les infrastructures critiques impliquent des échelles d'application variées. Quatre niveaux sont retenus pour comparer les méthodologies: international, national, régional et local (Figure 17a et 17b). Excepté le niveau international, les différents travaux s'appliquent de manière assez équilibrée aux différentes échelles d'application : 52,8% des méthodologies s'appliquent à l'échelle régionale, 44,4% à l'échelle nationale et 50% à l'échelle locale. Il ne semble donc pas possible d'identifier une tendance spécifique sur cet échantillon de revues. Par ailleurs, généralement, les méthodologies sont conçues pour une échelle donnée (Figure 17a et 17b : Echelles d'application des méthodologies). Seules quatre d'entre elles sont applicables aux quatre niveaux, six s'appliquent aussi bien à l'échelle régionale que nationale et deux aux échelles régionale et locale.

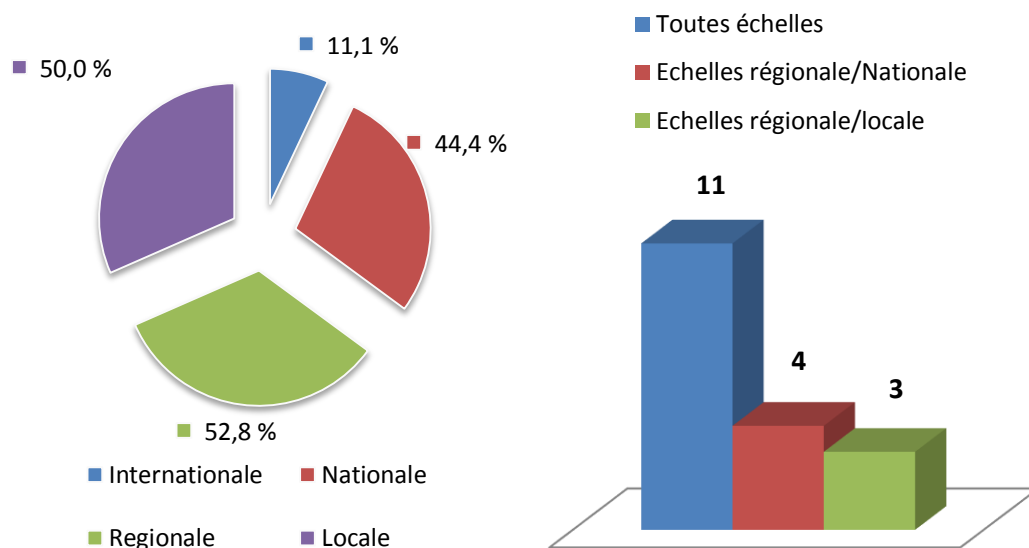


Figure 17a et 17b : Echelles d'application des méthodologies

ii. Echelle d'application par sous-secteurs d'activités

La Figure 18 présente l'association entre les sous-secteurs d'activités et les échelles d'application. Par exemple, l'électricité est appliquée dans 14% des cas à l'échelle internationale et 52% des cas aux autres échelles. Les sous-secteurs d'activités s'appliquent majoritairement aux échelles nationales et régionales (valeurs entre 50 et 100%). Pour l'échelle locale, l'ensemble des valeurs sont proches de 50%. Pour le secteur de l'eau, les méthodologies sont appliquées dans 53% des cas à l'échelle locale, ce qui semble faible compte tenu de la gestion locale de la fourniture d'eau potable en France. Ce résultat est probablement biaisé par le niveau d'abstraction retenu dans les modèles (secteur d'activité de l'eau ou réseau de distribution d'eau potable ou réservoir d'eau potable).

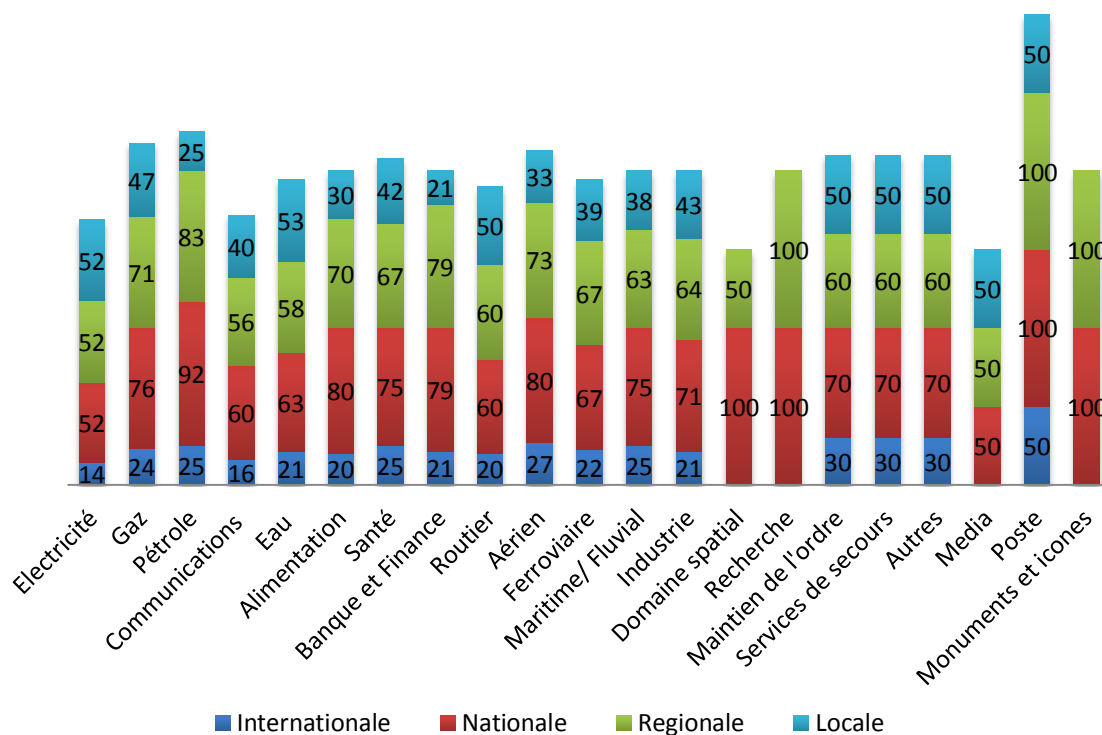


Figure 18 : Pourcentage d'association entre les sous-secteurs d'activités appliqués dans les méthodologies et les différentes échelles d'application

iii. Outil d'analyse utilisé en fonction de l'échelle d'application

La Figure 19 met en évidence la relation entre les outils utilisés et les échelles d'analyse. Les bases de données semblent être utilisées quelle que soit l'échelle. Les méthodologies utilisant le modèle non-opérabilité entrée-sortie s'appliquent à la fois à l'échelle régionale et l'échelle nationale, en raison notamment de la disponibilité des tableaux économiques à ces échelles. Les autres outils d'analyse, tels que les systèmes multi-agents sont davantage mis en œuvre aux échelles locale (neuf fois) et régionale (cinq fois) impliquant une plus grande quantité de données du fait du bas niveau d'abstraction des entités étudiées.

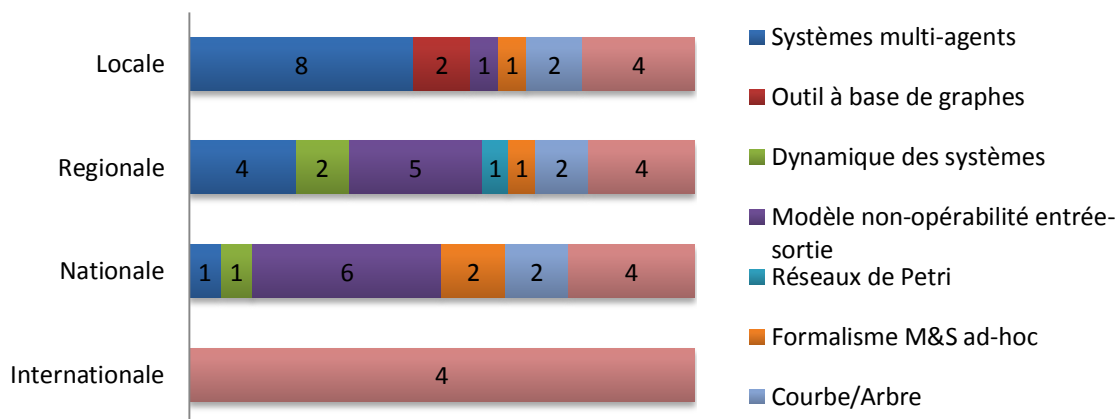


Figure 19 : Répartition de l'utilisation des outils d'analyse des interdépendances en fonction des échelles d'application

I-2.5. Formalisme d'identification des données d'entrée et résultats

Pour faciliter le choix d'une méthodologie selon les contraintes de l'étude sur les infrastructures critiques, la Figure 20 se propose de mettre en relation les outils identifiés précédemment en fonction des résultats souhaités et des données d'entrée disponibles.

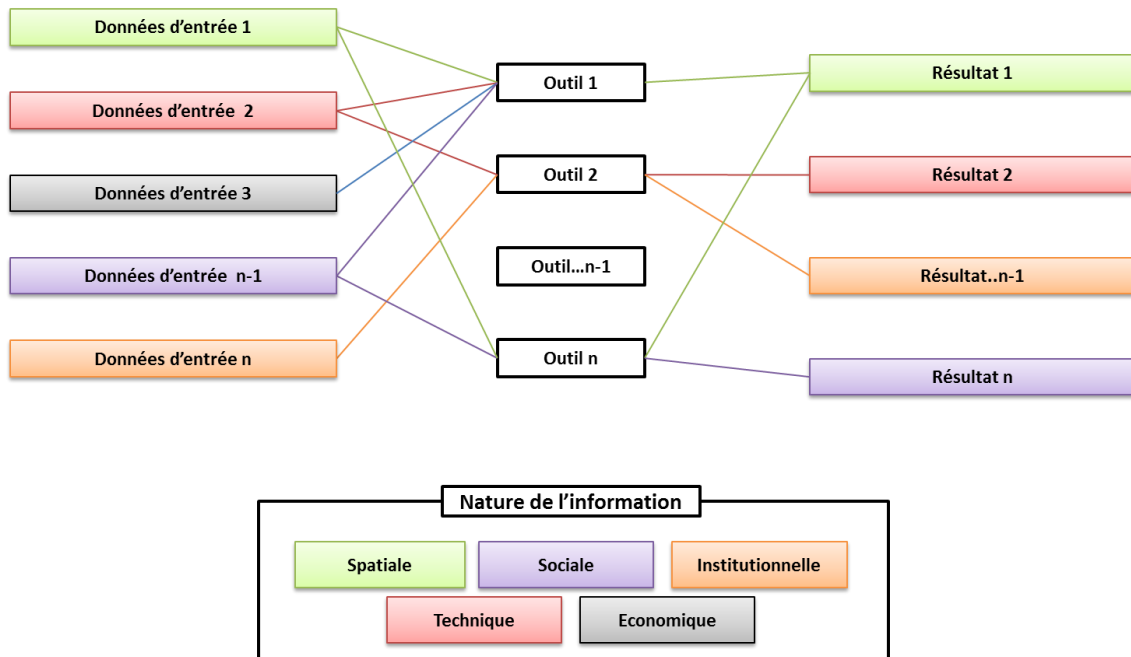


Figure 20 : Formalisme d'identification des données d'entrée et résultats de chaque outil d'analyse des interdépendances

D'autre part, les données d'entrée et résultats sont différenciées selon six dimensions :

- Spatiale (en vert) qui prend en compte les caractéristiques spatiales des infrastructures critiques comme évoquées au premier chapitre. Il s'agit par exemple des informations de localisation des IC, des zones de service desservies ou encore la direction des flux ;
- Sociale (en violet) qui concerne la population du territoire. Ces derniers peuvent être les usagers du service d'une IC mais également être indispensables au bon fonctionnement des IC ;
- Institutionnelle (en orange) qui prend en compte l'ensemble des mesures, textes législatifs, décisions prises par la gouvernance du territoire. Des mesures de délestage ou règles de priorités des clients imposées par la gouvernance sont des exemples d'information de dimension institutionnelle.
- Economique (en gris) qui prend en compte le contexte économique des IC. Il s'agit par exemple des informations sur les règles de marchés ;
- Technique (en rouge) se concentre sur les IC. Il s'agit par exemple des paramètres opérationnels ou organisationnels des infrastructures critiques (redondance, ressources alternatives,...) ;

Pour les autres informations, lorsque celles-ci sont sans dimension le remplissage du cadre est blanc avec un trait rouge et lorsqu'elles sont multidimensionnelles le

remplissage du cadre est blanc avec un trait noir.

Par ailleurs, la quantité importante de données d'entrée pour les outils de l'approche prédictive et la difficulté à les identifier impliquent l'introduction de catégories et sous-catégories (Figure 21). Cela conduit à effectuer une analyse non exhaustive des données d'entrée mais apporte une structure à l'identification de ces informations en se concentrant sur des informations ciblées.

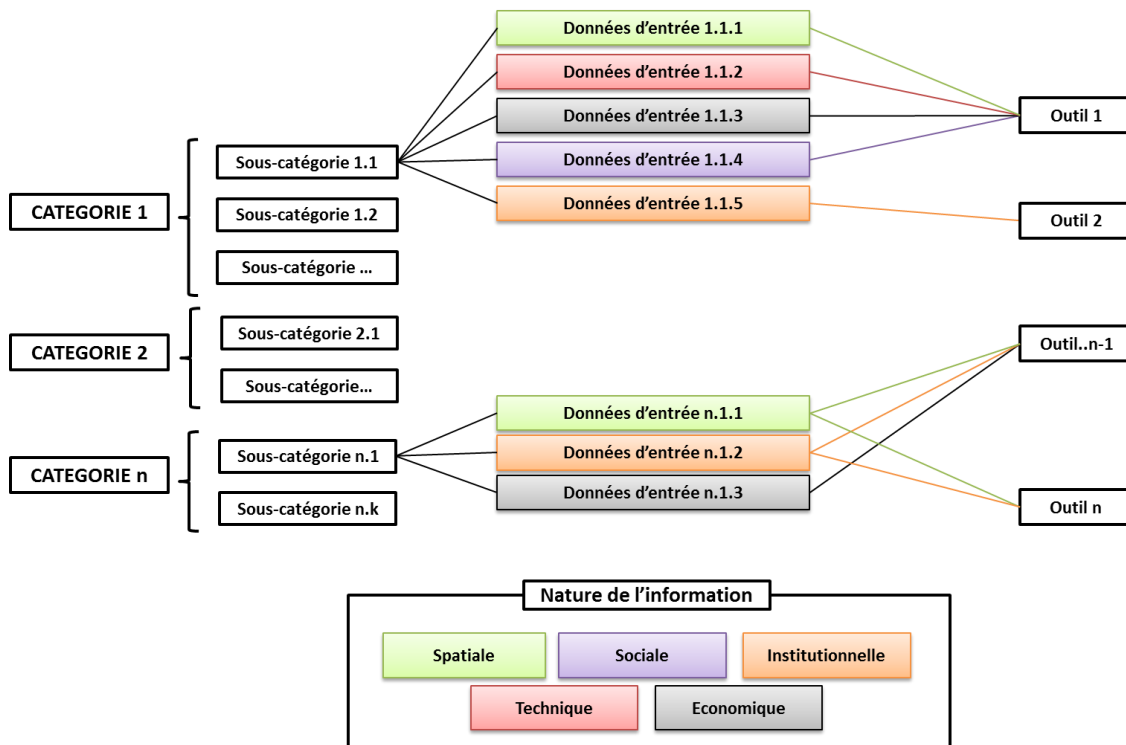


Figure 21 : Formalisme de l'analyse multidimensionnelle des données entrée de l'approche prédictive

Ces propos amènent à étudier dans la suite :

- Les sept outils d'analyse des interdépendances de l'approche prédictive à partir de la description des catégories de données d'entrée et des résultats associés selon leur dimension ;
- Les trente-deux méthodologies de l'approche prédictive afin d'identifier pour chaque outil utilisé les données d'entrée et résultats selon leur dimension.

Les quatre méthodologies de l'approche empirique selon la dimension des données d'entrée et résultats sont présentées en annexe du fait du peu d'intérêt qu'elles présentent pour les attentes du projet (voir annexe 1b).

I-2.6. Etude des outils de l'approche prédictive

Les données d'entrée et résultats possibles des outils de modélisation et simulation de l'approche prédictive sont identifiés.

I-2.6.1 Etude des données d'entrée

Du fait du nombre important de données d'entrée possibles, sept catégories sont définies. Il s'agit des données d'entrée associées aux différentes capacités de résilience, aux types d'interdépendances et de défaillances ainsi que la prise en compte de l'environnement des IC. Ces données d'entrée sont considérées comme des paramètres de fonctionnement ou des caractéristiques intrinsèques des IC appliqués par les différents outils d'analyse.

i. Capacités de résilience

La résilience est caractérisée par plusieurs capacités que peut avoir un système avant, pendant et après un évènement. Ouyang (2014) définit des stratégies de résilience afin de comparer les outils d'analyse des interdépendances de l'approche prédictive à partir d'une définition de la résilience basée sur trois capacités : la résistance, l'absorption et la remise en service. Or, il a été évoqué dans le premier chapitre que les capacités d'apprentissage et d'adaptation sont également liées au concept de résilience (UNISDR, 2012). Dans le cas de cette revue, les cinq capacités sont des catégories auxquelles on associe des stratégies de résilience ou des sous-catégories (d'après Ouyang, 2014).

Les capacités d'apprentissage et d'adaptation sont regroupées et ont pour but de favoriser les stratégies d'amélioration de l'organisation des IC pour augmenter les connaissances sur les signaux précurseurs, les mesures d'absorption et de remise en service mais aussi sur les stratégies du retour d'expérience et de prévention auprès des usagers (Figure 22). Huit données d'entrée découlent de ces sous-catégories. Elles se focalisent sur la planification des plans à mettre en place pour faire face à un évènement et sur la réalisation d'exercices pour améliorer la capacité d'apprentissage.

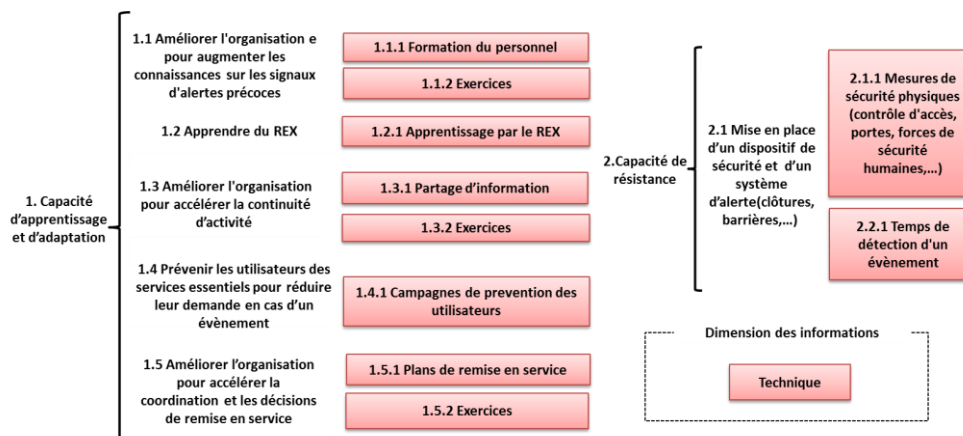


Figure 22 : Données d'entrée des catégories de capacité d'apprentissage et de résistance

La capacité de résistance associe une catégorie liée à la mise en place d'un dispositif de sécurité physique et d'alerte face à différents événements (Figure 22). Deux données d'entrée sont associées à cette catégorie. Il s'agit des mesures physiques mises en place comme des contrôles de véhicules ou des personnes à l'entrée et sortie des IC. Le second critère est le temps de détection d'une défaillance.

La capacité d'absorption réunit trois sous-catégories décrivant l'optimisation du fonctionnement normal des IC, la mise en place de mesures de continuité d'activité et la gestion des besoins des usagers (Figure 23). Les données d'entrée principalement de dimension technique sont des paramètres de fonctionnement des IC comme la capacité maximale de fourniture de service, des stocks ou des caractéristiques intrinsèques (exemple : utilisation des réseaux intelligents ou mesures de substitution).

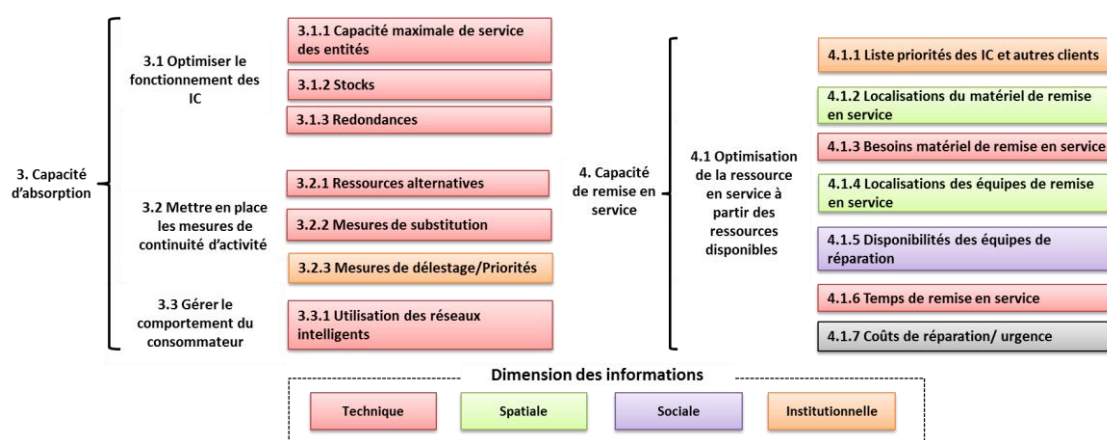


Figure 23 : Données d'entrée de la catégorie capacité d'absorption et de remise en service

La capacité de remise en service est décrite par la sous-catégorie optimisation de la remise en service qui met en avant sept données d'entrée possibles (Figure 23). Celles-ci concernent la localisation et le besoin du matériel de remise en service nécessaire ainsi que la localisation et la disponibilité du personnel pour ces opérations. D'autres données d'entrée peuvent être intégrées comme une liste de priorités d'IC à rétablir, le temps de remise en service et la prise en compte du coût de rétablissement.

Par ailleurs, la Figure 24 détaille les données d'entrée présentées précédemment afin de constater les différentes dimensions prises en compte. La dimension technique des IC est largement dominante. La dimension institutionnelle concerne les données d'entrée sur l'instauration de règles de priorités de service ou de remise en service suite à un événement. Ces règles sont instaurées par la gouvernance du territoire qui coordonne les opérations de continuité d'activité et de remise en service. Les dimensions sociales, économiques et spatiales apparaissent uniquement dans la capacité de remise en service des IC afin de tenir compte de la disponibilité et localisation de la ressource humaine, du matériel nécessaire ainsi que du coût de ces mesures.

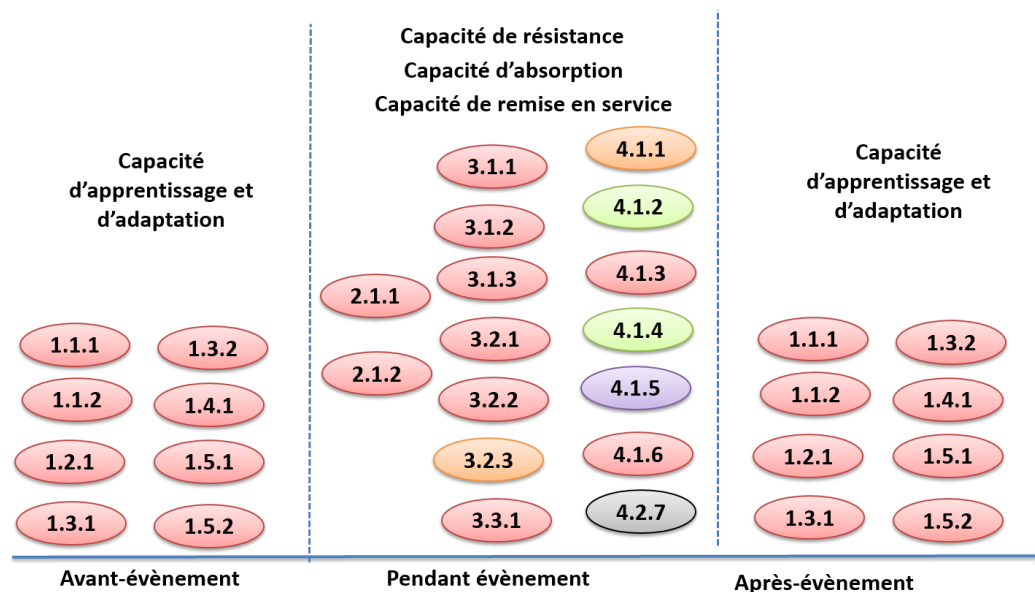


Figure 24 : Dimensions des données d'entrée des capacités de résilience

ii. Les types d'interdépendance et de défaillances

Les quatre types d'interdépendances définis par Rinaldi *et al.*(2001) (physiques, géographiques, cybernétiques, logiques) correspondent à la quatrième catégorie. Pour les interdépendances de types physiques et cybernétiques, la connaissance des échanges de flux (matière, énergie, informations, personnes, financiers) sont les données d'entrée (Figure 25). Les liens logiques et géographiques entre les IC sont les données d'entrée pour les types d'interdépendance géographique et logique.

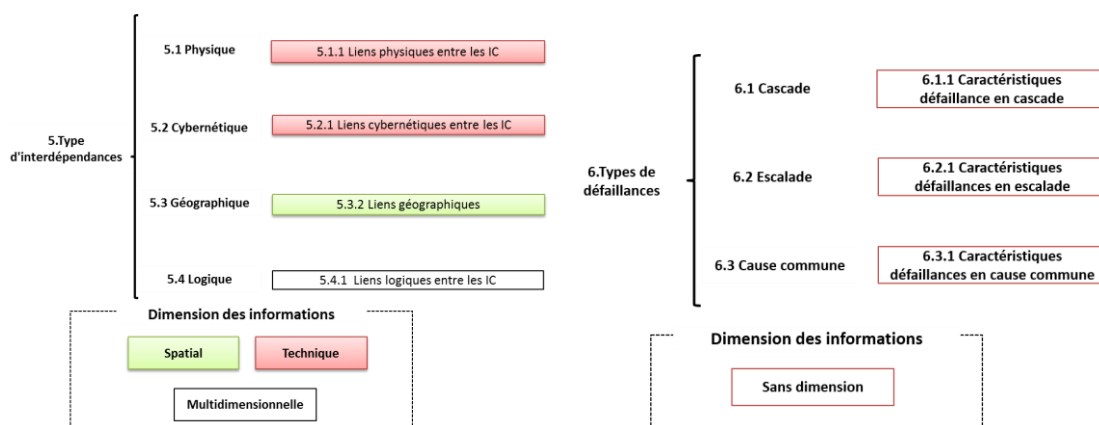


Figure 25 : Données d'entrée via les critères des types d'interdépendances et types de défaillance

Les trois types de défaillances définis par Rinaldi *et al.*(2001) (cascade, escalade et cause commune) forment la sixième catégorie de données d'entrée (Figure 25). Pour chaque type, l'attention sera portée uniquement aux données d'entrée sur les caractéristiques des événements initiaux.

Le but d'identifier ces données d'entrée est d'obtenir des précisions sur la manière dont sont introduits les liens d'interdépendances (cartes, opérateurs,...) et quelles caractéristiques des événements initiaux sont retenues (intensité, durée,...).

iii. Contexte social et économique des IC

La dernière catégorie concerne le contexte social et économique des IC lors de leur mode normal de fonctionnement (Figure 26). Deux données d'entrée sont associées au contexte social. Il s'agit du nombre d'utilisateurs du service des IC et du nombre d'employés nécessaire pour chaque IC. Le contexte économique est pris en compte à partir des règles économiques.

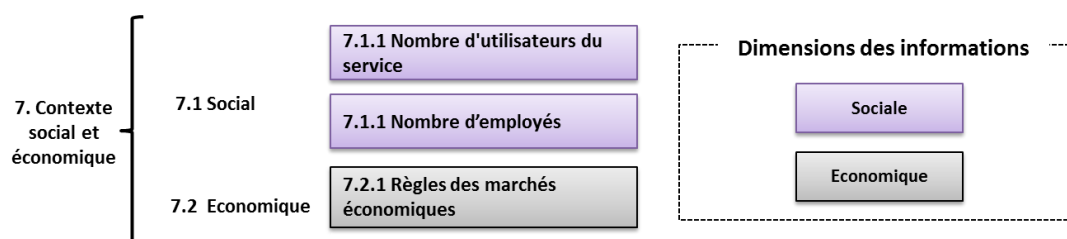


Figure 26 : Données d'entrée de la catégorie contexte social et économique des IC

I-2.6.2 Etude des résultats

Une typologie de résultats que peuvent proposer les différents outils d'analyse des interdépendances est proposée Figure 27. Cela concerne des pertes de service, d'intégrité ou de revenus des IC mais aussi l'environnement des IC avec le nombre d'utilisateurs impactés. D'autres résultats sont également intéressants à mettre en avant. Il s'agit de l'évolution des stocks et des ressources alternatives au cours de la simulation. Pour la dimension spatiale, la mise en évidence de secteurs vulnérables est particulièrement intéressante. Les deux derniers résultats se basent sur la multiplication de scénarios afin de tester des stratégies d'optimisation économique ou de service.

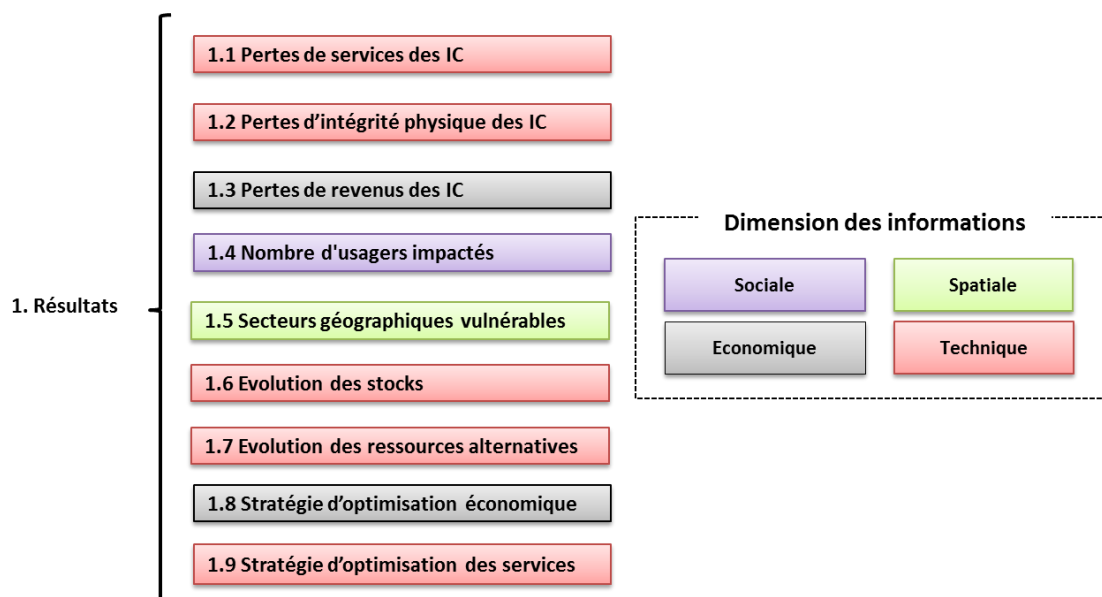


Figure 27 : Typologie de résultats

I-2.7. Etude des méthodologies de l'approche prédictive à partir du formalisme multidimensionnel

La description des sous-catégories a mis avant plusieurs données d'entrée qui peuvent être intégrées aux outils d'analyse des interdépendances. Il est possible de distinguer de la même manière qu'au chapitre 1, les sous-catégories des données d'entrée que réalisent les différents outils (voir annexe 2). Trois commentaires peuvent ainsi être effectués et articulent l'application des données d'entrée et résultats des méthodologies :

- Le modèle non-opérabilité entrée sortie prend en compte peu de sous-catégories de données d'entrée ;
- Les SMA et le formalisme de modélisation et simulation ad-hoc qui peuvent utiliser l'ensemble des sous-catégories de données d'entrée ;
- Les quatre autres outils (dynamique des systèmes, outils à base de graphe, réseau de Pétri et arbres/courbes) réalisent certaines sous-catégories de données d'entrée.

I-2.7.1 Cas du modèle non-opérabilité entrée-sortie

Des adaptations au modèle entrée sortie sont faites concernant la détermination des coefficients techniques mais aussi sur les différents résultats obtenus en fonction des échelles spatiales et temporelles (Figure 28 ; Figure 29).

Généralement, les coefficients techniques sont construits à l'aide de tableaux économiques entrée sortie afin de déterminer les liens entre les secteurs d'activités. Les travaux américains utilisent les données du 'Bureau of Economic Analysis Division of the U.S' ([10], [11], [13], [32] et [34]) alors que les travaux européens [15] utilisent les données Eurostat I-O. Toutefois, il est possible de déterminer ces coefficients via les résultats de questionnaires et d'interviews d'opérateurs ([12]) ou des résultats d'autres outils d'analyse des interdépendances comme la simulation des SMA dans [14]. Dans le cas de ces adaptations, les résultats sont uniquement des pertes de services des secteurs et les tableaux économiques ne sont pas des données d'entrée.

D'autre part, l'utilisation du modèle non-opérabilité entrée-sortie fait apparaître trois résultats (figure 31) : les pertes de service ou non-opérabilité des IC, les pertes économiques ou la stratégie d'optimisation économique. Les résultats sur les pertes de services ou économiques des secteurs se différencient selon les échelles temporelles et spatiales. Classiquement, le modèle non-opérabilité entrée-sortie étudie les pertes sur une année. L'échelle spatiale dépend du tableau économique entrée-sortie utilisé comme donnée d'entrée. L'étude des méthodologies [10], [11], [13], [15] indique que la mise en place de multiplicateurs ou de coefficients permet le passage d'une échelle à une autre. Ainsi, pour l'échelle temporelle, des multiplicateurs dynamiques sont instaurés dans [10] afin de considérer les pertes ultérieures à un an. Ces dernières estiment les pertes économiques à cinq ans en tenant compte notamment des retards de production, des coûts de réparation, des mesures d'intervention d'urgence et des pertes de capitaux fixes.

Par ailleurs, une utilisation approfondie du modèle non opérabilité entrée-sortie peut permettre de tester plusieurs scénarios pour mesurer l'efficacité de stratégies ou d'objectifs de management des risques. Dans le cas de [32], la méthodologie utilise le modèle non opérabilité entrée-sortie afin de tester plusieurs stratégies de résilience pour minimiser les coûts de préparation, de remise en service et les pertes

des secteurs pendant la remise en service. Pour [34], les auteurs testent l'efficacité de stratégies de management des risques à partir de la distribution de probabilités du paramètre de réduction de la demande dans l'équation du modèle non opérabilité entrée sortie.

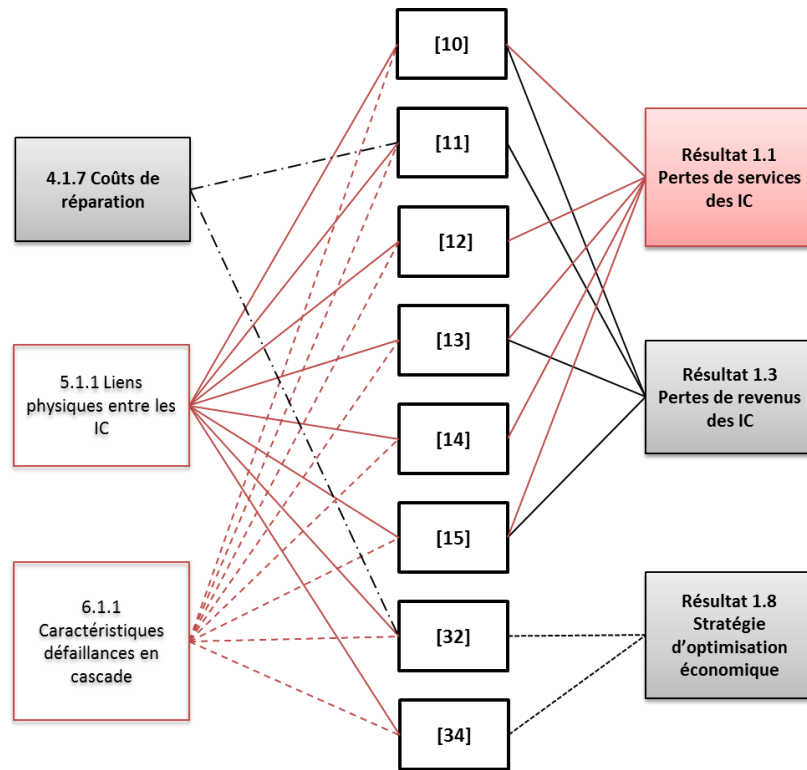


Figure 28 : Données d'entrée et résultats des méthodologies utilisant le modèle non-opérabilité entrée-sortie

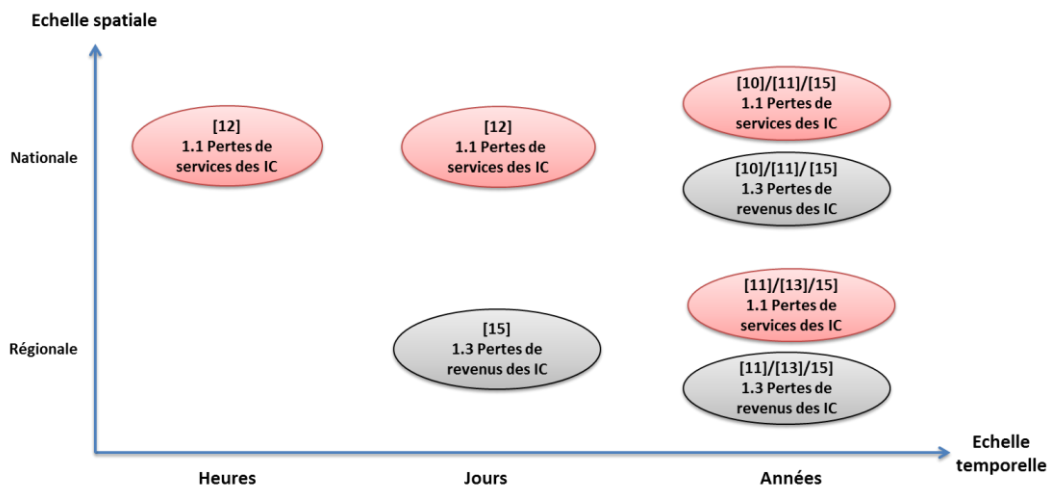


Figure 29 : Echelles spatiale et temporelle des résultats des pertes de service et économiques du modèle non-opérabilité entrée-sortie

I-2.7.2 Systèmes multi-agents et formalisme de modélisation et simulation ad-hoc

Quinze méthodologies utilisent les systèmes multi-agents et le formalisme de modélisation et simulation ad-hoc.

Afin de modéliser et simuler le comportement des IC, il est nécessaire de connaître les liens d'interdépendances qui sont pris en compte (Figure 31). Les liens logiques sont étudiés une seule fois (cas de [21]) au contraire des liens physiques et cybernétiques qui sont largement examinés dans les méthodologies. Ces données sont obtenues par divers moyens. Dans le cas d'une méthodologie utilisée pour des besoins militaires ou pour des besoins de sécurité civile, les données sont issues de cartes satellites ([4] et [31]). Dans les autres cas, il peut s'agir de cartes représentant la topologie des réseaux (cas de [30]) ou de proposer directement sa propre identification des liens physiques et cybernétiques ([16], [19], [29]). Les méthodologies [21] et [29] tiennent compte des interdépendances géographiques en cas de phénomènes d'explosion ou d'incendie. Dans le cas de [29], une matrice complétée directement par les utilisateurs de la méthodologie identifie les liens géographiques entre les IC. La méthodologie [21] utilise la localisation des IC et la zone d'impact d'un phénomène pour déterminer ces liens. Les interdépendances logiques sont déterminées directement dans [21] par les utilisateurs afin de modéliser et simuler le comportement des différents modes de transport à l'échelle régionale. Il s'agit par exemple des liens entre les gares ferroviaires et routières qui impliquent qu'en cas de grève de trains, les usagers vont répercuter en partie leur demande sur le transport en bus.

Les défaillances initiales en cascade et en cause commune sont prises en compte (Figure 31). Les événements initiaux qui impactent les IC sont principalement d'origine interne. Ils proviennent de la défaillance d'une ou plusieurs IC qui va toucher une ou plusieurs autres IC. Il s'agit par exemple dans le cas de [5] de suivre la propagation de la perte d'un ou plusieurs routeurs stockant des données pendant une période de temps sur les IC de banque. Les événements d'origine externe sont pris en compte dans la méthodologie [21]. Dans ce cas, l'intensité d'un événement est estimée afin d'évaluer son impact sur l'IC. Celui-ci est calculé à partir d'une courbe représentant l'intensité de l'événement en fonction de l'impact établie préalablement par des opérateurs/experts.

Les travaux méthodologiques n'intègrent pas les informations sur les capacités d'apprentissage et d'adaptation des IC (Figure 31). La capacité de résistance est considérée uniquement dans [21] afin de réduire les distances de danger des IC suite aux phénomènes d'explosion ou incendie (barrières de protection,...) (Figure 31). La propagation d'un événement est par contre suivie en tenant compte les données d'entrée des IC des capacités d'absorption ou de remise en service (Figure 31). L'intégration de ces données d'entrée fait émerger deux orientations de résultats. D'une part, les méthodologies (orientation 1) qui modélisent et simulent le comportement des IC afin d'estimer les pertes fonctionnelles ou économiques suite à un événement (cas de [4], [5], [6], [7], [9], [16], [19], [21], [26], [29] et [30]). Les autres travaux méthodologiques (orientation 2) étudient le comportement des IC interdépendantes lors de la remise en service (cas [27], [31] et [35]).

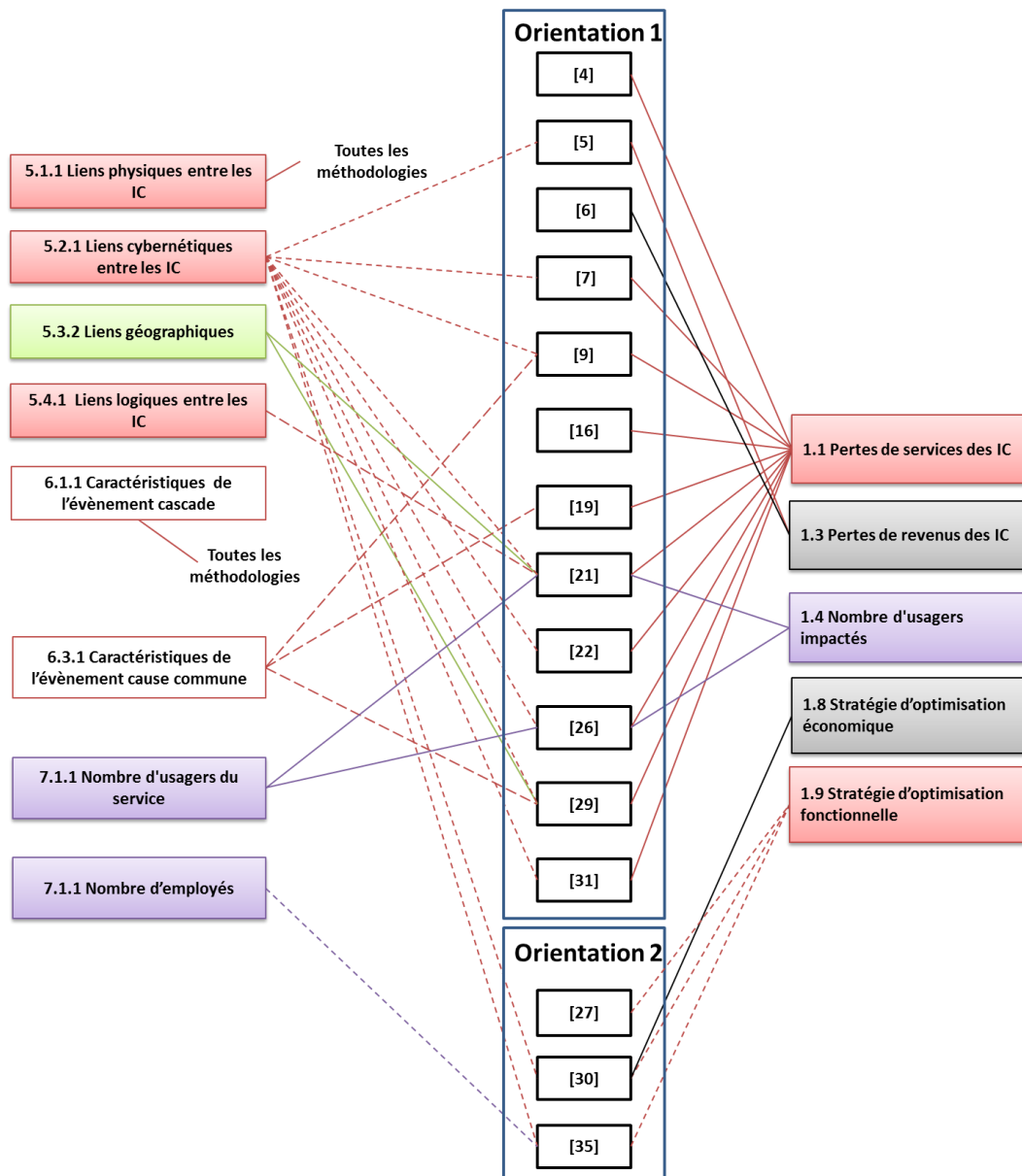


Figure 30 : Données d'entrée (catégories 5 à 7) intégrées aux systèmes multi-agents et au formalisme de modélisation et simulation ad-hoc

Les flux financiers entre les IC et des entreprises sont étudiés dans [6] afin d'identifier les entités les plus vulnérables économiquement suite à l'interruption d'une IC. Dans le cas des pertes fonctionnelles ou de services, celles-ci sont estimées par rapport :

- A la demande (cas de [9], [16], [19], [21], [22], [26] et [29]). Il s'agit de la demande des voyageurs dans le cas des travaux [21] et [26] qui modélisent et simulent les activités de transport de personnes. Le nombre d'utilisateurs impactés est alors calculé. Dans le cas de [16], [19], et [29], il s'agit de la demande en ressources d'énergie, de matières ou d'informations des IC. [21] intègre également la capacité maximale de service et le temps de remise en service des IC afin d'estimer les pertes de service au cours du temps ;
- A la quantité de stocks de données perdues dans [5] qui modélise et simule le comportement des communications et des banques.
- Au nombre de reconfigurations des routeurs (cas de [7]) ;
- Aux photos satellites ([4]).

Les méthodologies [30] et [35] modélisent et simulent la remise en service des IC. Dans le cas de [30], le comportement des IC est analysé suite à un évènement à partir de la prise en compte des données concernant le temps de réparation, le coût de réparation et les priorités de réparation afin d'optimiser les stratégies de remise en service. La méthodologie [35] étudie différents plans de remise en service pour un service de dialyse en prenant en compte sa dépendance à différentes ressources (eau, électricité, communications). La méthodologie [27] emploie un formalisme de modélisation et simulation ad-hoc afin d'optimiser en termes de temps et quantité de ressources les besoins des IC en répondant au maximum à la demande des usagers suite à un évènement.

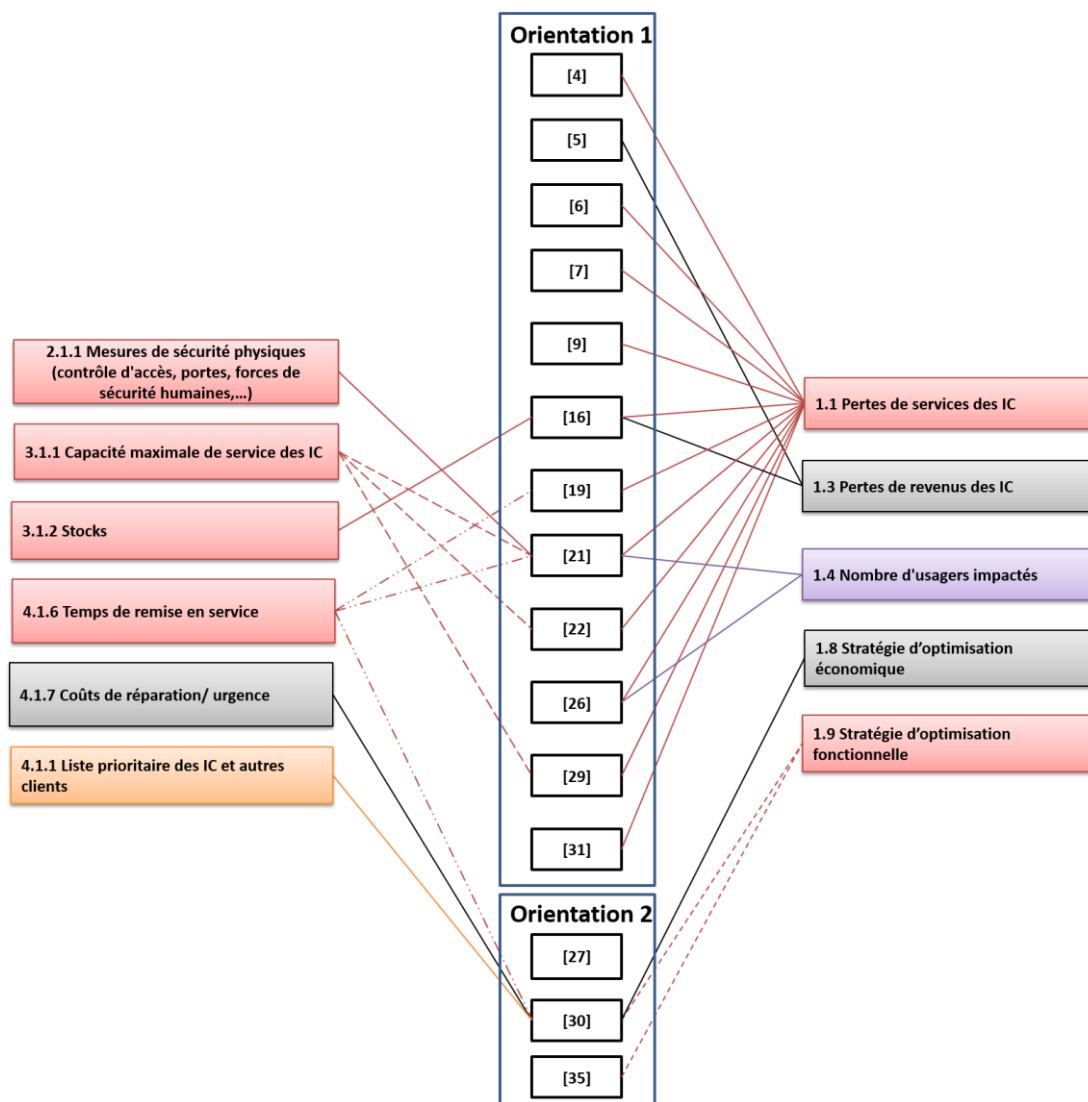


Figure 31 : Données d'entrée (catégories 1 à 4) aux outils systèmes multi-agents et formalisme de modélisation et simulation ad-hoc

I-2.7.3 Autres applications des outils prédictifs

Huit méthodologies utilisant les outils à base de graphe, les réseaux de Pétri, la dynamique des systèmes et les courbes/arbres sont comparées.

Les types d'interdépendances physiques et cybernétiques sont majoritairement intégrés aux différents travaux (Figure 32). Les interdépendances géographiques sont étudiées dans les cas [1] et [28] en prenant en compte les phénomènes d'incendie et d'explosion. Ces liens géographiques sont identifiés par des experts/opérateurs dans le cas de [28]. La méthodologie [1] utilise la localisation des IC et la zone d'impact d'un phénomène pour déterminer les liens géographiques possibles.

Les événements impactant les IC sont d'origines internes ou externes (Figure 32). Les événements externes sont pris en compte de manière minoritaire (cas de [28]) et sont caractérisés par une valeur de fréquence. D'autre part, les événements initiaux sont déclenchés en cascade ou en cause commune. Le déclenchement en cause commune concerne uniquement les méthodologies [2] et [33] et est effectué de manière aléatoire. Dans le cas de [2], un maillage de la zone d'étude est construit afin d'identifier des secteurs d'étude critiques. L'analyse porte alors sur la simulation du comportement des IC sans les entités du secteur étudié.

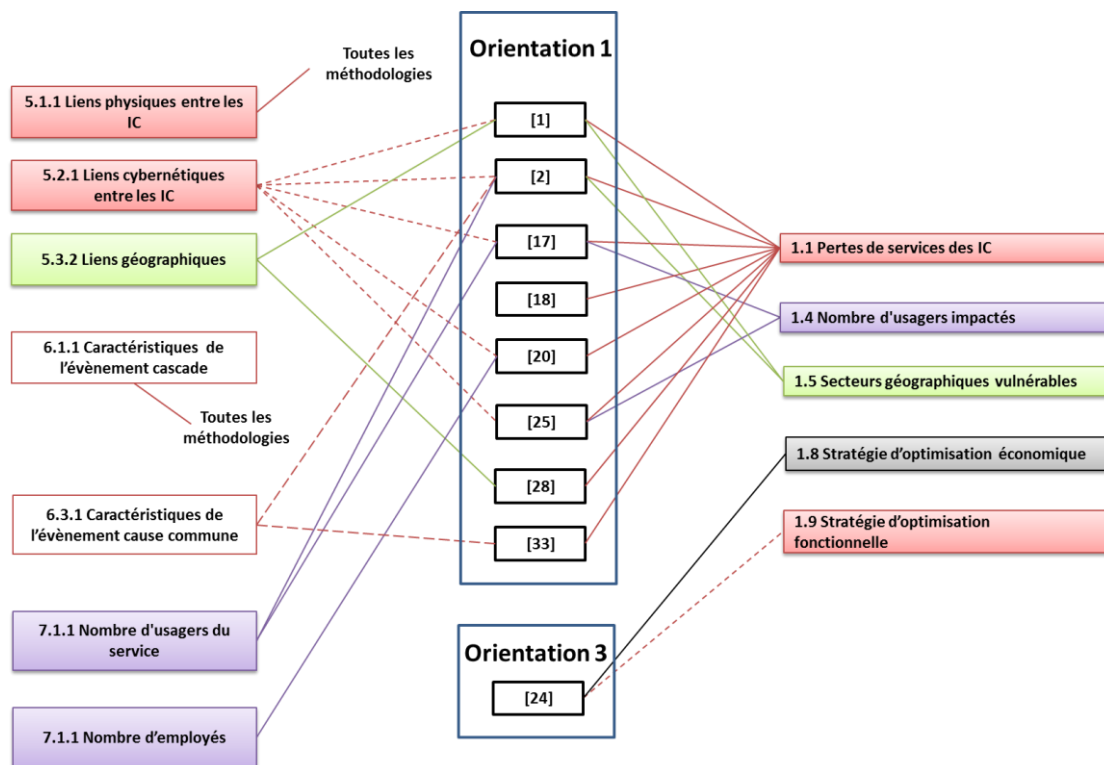


Figure 32 : Données d'entrée (catégories 5 à 7) aux outils de dynamique des systèmes, outils à base de graphes, réseau de pétri et courbes/arbres

Les capacités d'apprentissage et d'adaptation ne sont pas prises en compte par les travaux (Figure 33). En ce qui concerne la capacité de résistance, les mesures de protection sont intégrées aux méthodologies [1] et [28] afin de diminuer les impacts des phénomènes d'explosion et d'incendie sur les IC (Figure 33).

L'intégration des données d'entrée des capacités d'absorption et de remise en service (Figure 33) permet de visualiser l'évolution de l'état de fonctionnement ou de service des IC (orientation 1) au cours du temps ([1], [2], [17], [18], [20], [25], [28], [33]). Toutefois, dans le cas de [24], il s'agit d'optimiser la capacité d'absorption des IC en travaillant sur une meilleure répartition des ressources suite à un événement (orientation 3).

Afin de suivre l'évolution du fonctionnement des IC, les outils à base de graphes intègrent la redondance des IC dans leur modèle ([2], [18]). La méthodologie [2] ajoute un modèle fonctionnel afin de tenir compte des stocks, des ressources alternatives et du temps de remise en service pour les nœuds du graphe. Les stocks et ressources alternatives sont traduits en temps d'autonomie supplémentaire de fonctionnement pour les IC. Le nombre d'utilisateurs impactés est évalué dans [2] à partir des pertes fonctionnelles. Les outils courbes/arbres sont utilisés par les méthodologies [1], [20], [25] et [28] pour suivre l'évolution des IC interdépendantes. Dans le cas de [1], des courbes sont construites pour chaque secteur géographique d'une zone d'étude donnée afin de constater la dépendance des IC à une ressource. Par exemple, une courbe est construite pour estimer à partir de combien de temps les réseaux d'eau, communications, transport routier et gaz naturel ne fonctionnent plus suite à l'interruption du réseau électrique. Les ressources alternatives sont insérées dans l'outil afin d'ajouter une durée supplémentaire d'autonomie des IC. L'originalité de cette démarche méthodologique provient des résultats opérationnels obtenus par la collaboration entre les opérateurs, la gouvernance des territoires et les concepteurs de ce travail utilisés dans le cas de la planification des mesures d'urgence et des plans de continuité des opérations. Les méthodologies [20] et [28] utilisent des courbes et arbres afin d'analyser la succession des IC impactées dans le temps suite à un évènement. La dimension temporelle est prise en compte dans [20] alors que dans [28], l'estimation des impacts et de la fréquence du scénario conduit à calculer un indice de risque. La méthodologie [17] utilise l'outil de dynamique des systèmes avec la définition de plus de deux mille deux cent cinquante variables. Plusieurs scénarios d'application sont alors effectués pour suivre l'évolution du comportement des IC. Un des scénarios mesure l'impact d'un black-out sur les communications et les services d'urgence. La durée du black-out et le temps de remise en service sont pris en compte. Le coût global de l'évènement est également évalué à partir des pertes de services des IC.

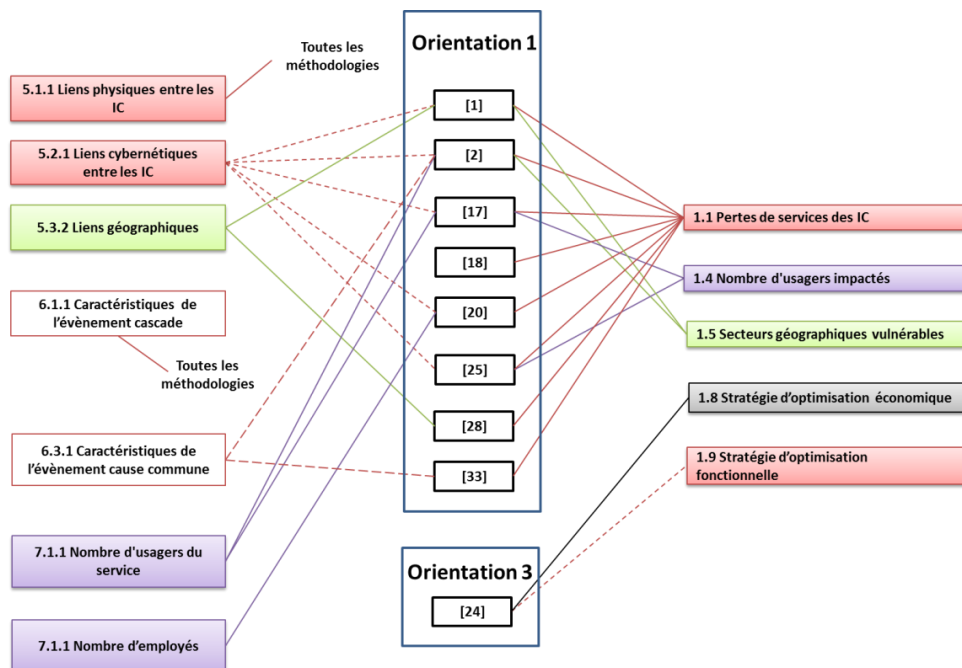


Figure 33 : Données d'entrée (catégories 1 à 4) aux outils de dynamique des systèmes, outils à base de graphes, réseau de pétri et courbes/arbres

Dans le cas de [24], la méthodologie optimise les capacités d'absorption du système d'IC à partir de l'outil de dynamique des systèmes. Elle détermine la meilleure solution de répartition de matières ou services des infrastructures disponibles (électricité, pétrole, gaz, eau, communication) des secteurs économiques (résidentiel, commercial, transport, industrie) dans le cas d'une défaillance. Cette simulation est réalisée en minimisant l'impact économique potentiel (à partir d'un algorithme d'optimisation non-linéaire) et en faisant varier les scénarios (intensité, durée, lieu de l'évènement initial).

I-2.7.4 Analyse et synthèse des méthodologies prédictives

L'étude des données d'entrée et des résultats des méthodologies de l'approche prédictive a été faite en trois temps. Le premier temps se consacre aux méthodologies utilisant le modèle non-opérabilité entrée-sortie afin d'illustrer les adaptations faites de l'outil lors de son application aux méthodologies. Le second et troisième temps se consacrent à l'utilisation des autres outils par les méthodologies et mettent ainsi en avant plusieurs pratiques dans l'intégration des différentes données d'entrée.

Il ressort des méthodologies appliquant le modèle non-opérabilité entrée-sortie des adaptations sur la détermination des coefficients techniques mais aussi sur les différents résultats en fonction des échelles spatiales et temporelles. Les coefficients techniques des secteurs peuvent être déterminés à partir de valeurs non-opérabilité d'experts/opérateurs ou d'autres outils d'analyse des interdépendances construits à un niveau de granulométrie des IC inférieures. Les résultats se concentrent uniquement sur des pertes fonctionnelles dans ces cas. Les résultats des pertes fonctionnelles et économiques peuvent être évalués à plusieurs échelles spatiales et temporelles à partir de l'utilisation de multiplicateurs. Les résultats sont par exemple calculés à l'échelle nationale à l'aide de l'outil et estimés à l'échelle régionale par des multiplicateurs. Il en est de même pour passer de résultats annuels à plusieurs années afin de considérer les pertes économiques sur le long terme. Par ailleurs, des méthodologies testent l'efficacité de différentes stratégies ou objectifs de gestion des risques à partir des résultats des pertes fonctionnelles et économiques des secteurs d'infrastructures critiques.

L'utilisation des autres outils de l'approche prédictive laisse apparaître plusieurs commentaires.

Les interdépendances physiques et cybernétiques sont majoritairement étudiées. Ces liens sont identifiés à l'aide de cartes ou via les utilisateurs de la méthodologie ou des experts/opérateurs. L'intégration des liens géographiques et logiques est plus rare. Ils sont déterminés par les utilisateurs, les experts/opérateurs ou par la localisation et les zones d'impacts uniquement dans le cas des interdépendances géographiques.

Les défaillances initiales en cascade ou en cause commune sont appliquées dans les méthodologies. Les événements initiaux en cause commune sont déterminés par l'utilisateur ou de manière aléatoire. Un maillage de la zone d'étude permet de supprimer les IC d'une maille et suivre le comportement des autres entités. Des secteurs géographiques critiques sont ainsi mis en avant. Par ailleurs, l'évènement initial impactant une ou plusieurs IC. Les méthodologies ne s'intéressent pas aux causes de défaillance des IC mais davantage à la propagation de la perte de fonctionnement d'une ou plusieurs IC sur les autres.

Aucune donnée d'entrée intégrée aux outils ne concerne le critère sur la capacité d'apprentissage. Les données d'entrée issues de la capacité de résistance des IC sont utilisées dans la prise en compte des interdépendances géographiques entre les IC. Ces mesures de résistance réduisent ainsi les distances d'effets des phénomènes d'explosion et d'incendie. L'intégration des données d'entrée correspondant aux critères d'absorption et de remise en service amène trois orientations de résultats méthodologiques. D'une part, la première orientation permet l'évaluation des impacts fonctionnels et économiques. Ces derniers sont estimés selon le service et la demande des IC. A partir des valeurs de pertes de services ou fonctionnels, le nombre d'utilisateurs impactés et les pertes économiques des IC sont calculés. D'autre part, la seconde orientation concerne la remise en service des IC suite à un événement à partir des besoins et ressources disponibles en tenant compte des interdépendances. La dernière orientation porte sur l'optimisation des ressources pour les IC suite à un événement en prenant en compte la capacité maximale de service ou les stocks disponibles.

Par ailleurs, le nombre de données d'entrée des différentes catégories intégrées par les outils des méthodologies est relativement faible. L'hétérogénéité et la complexité de fonctionnement des infrastructures critiques ainsi que les obstacles d'obtention des données fournissent les premières explications à cette faible intégration. Cela engendre une prise en compte partielle des différentes fonctionnalités des infrastructures critiques (distribution, transport, stockage, production,...) et conduit à des méthodologies peu opérationnelles pour la planification des mesures de continuité ou rétablissement d'activités. De plus, les méthodologies se concentrent à insérer majoritairement les informations de dimension technique. L'environnement des infrastructures critiques via les dimensions sociale et institutionnelle est peu intégré malgré son importance en temps de crise. Le contexte territorial des IC est donc peu associé à ces différents travaux (Rey *et al.* 2013, voir annexe 3).

I-2.8. Synthèse

Un cadre d'analyse décomposé en deux phases a permis d'analyser trente-six méthodologies d'étude des interdépendances entre infrastructures critiques.

La première phase permet plusieurs enseignements. Le formalisme de modélisation et simulation ad-hoc et des courbes/arbres sont deux nouveaux outils prédictifs mis en évidence par rapport au premier chapitre. Le premier outil dispose des avantages semblables à l'outil des systèmes multi-agents via l'intégration de nombreuses données d'entrée. D'autre part, l'étude des sous-secteurs d'activités montre que les travaux étudient principalement soit deux soit plus de onze sous-secteurs d'activités. Les sous-secteurs d'activités concernant l'électricité et les communications sont majoritairement retenus. Les outils bases de données et modèle non opérabilité entrée sortie permettent de traiter un nombre important de secteurs contrairement aux autres. Il existe donc très peu de travaux prédictifs multisectoriels analysant les interdépendances entre les IC puisque le modèle non opérabilité entrée sortie analyse le comportement des secteurs d'IC interdépendants. Par ailleurs, les méthodologies s'appliquent de manière assez équilibrée aux échelles nationale, régionale et locale. Toutefois, très peu de méthodologies sont multi-échelles à l'exception de celles utilisant les bases de données ou le modèle non opérabilité entrée sortie qui emploie des multiplicateurs pour transposer les résultats d'une échelle à une autre.

Il semble qu'il n'existe pas de démarche permettant une approche intersectorielle et multi-échelles à bas niveau d'abstraction des IC.

Les travaux de l'approche prédictive sont analysés via les catégories de données d'entrée et les résultats des différents outils dans la seconde phase. Plusieurs enseignements sont alors tirés :

- Les liens physiques et cybernétiques sont largement étudiés tandis que les liens logiques sont rarement pris en compte. Les liens géographiques sont étudiés via les phénomènes d'explosion ou d'incendie. Ces liens sont identifiés par les opérateurs/experts, utilisateurs ou des cartes ;
- Les défaillances en cascade et plus rarement les défaillances en cause commune sont abordées. Les méthodologies mettent en avant les conséquences engendrées par une défaillance d'une IC sans réellement s'intéresser aux causes des événements ;
- Aucune donnée d'entrée des capacités d'apprentissage et d'adaptation n'est intégrée dans les méthodologies ;
- Les mesures de protection relatives à l'aléa (donnée d'entrée de type capacité de résistance) influent de manière significative sur le dimensionnement des zones de dangers en les diminuant ;
- Les données d'entrée des capacités d'absorption et de remise en service mettent en avant trois orientations distinctes des résultats méthodologiques : l'évaluation des pertes fonctionnelles et économiques, la remise en service des IC interdépendantes et l'optimisation des échanges entre les IC suite à un événement.

Par ailleurs, le faible nombre de données d'entrée intégré dans les outils des méthodologies et la dimension technique de ces informations met en avant une prise en compte partielle des opérations et du contexte territorial des infrastructures critiques. Cela conduit à considérer que les méthodologies existantes sont peu opérationnelles pour la planification des mesures de continuité et rétablissement d'activités d'un territoire.

Partie II : Méthodologie d'évaluation de l'impact d'une perturbation majeure sur un Territoire composé d'Activités Essentielles – Concepts, Démarche et Application

Articulée en trois chapitres, cette seconde partie se consacre à l'élaboration d'une nouvelle démarche méthodologie d'analyse des interdépendances sur un Territoire composé d'Activités Essentielles (TcAE). Le premier chapitre développe la problématique initiale à partir des informations obtenues dans la première partie du manuscrit et définit plusieurs concepts méthodologiques. Le second chapitre déroule l'ensemble de la démarche méthodologie structurée en trois étapes. Une application sur un TcAE pilote à l'échelle départementale clôture cette partie.

II-1. Concepts méthodologiques

Ce chapitre justifie la mise en place d'une nouvelle démarche méthodologique. Articulée en trois étapes, les principaux concepts et définitions de cette méthodologie innovante sont ensuite présentés.

II-1.1. Démarche méthodologique

Les événements dramatiques des décennies passées ont eu des répercussions directes et indirectes sur les infrastructures critiques et la population d'un territoire. Les impacts indirects sont engendrés par les différents types d'interdépendances entre les IC (d'après Rinaldi *et al.*, 2001) et les interactions avec la population. En effet, les IC fournissent des services essentiels à la population en fonctionnement normal et en temps de crise ; et en retour une partie de la population participe à leur fonctionnement.

En France, en réponse à un événement dramatique, la gouvernance du territoire organise la continuité et le rétablissement d'activité des IC en lien avec les opérateurs. Cette action demande un travail préalable de planification des mesures temporaires à apporter pendant la crise (exemple : installation de groupes électrogènes en cas d'interruption électrique) mais aussi l'établissement des mesures pérennes de traitement des risques (exemple : délocalisation d'une IC). Afin de déterminer les mesures adéquates, il est nécessaire de modéliser et simuler le comportement des IC et la population du territoire afin de connaître les impacts directs et indirects d'un événement majeur. Une stratégie de résilience systémique peut ensuite être proposée.

Dans cet objectif, une démarche méthodologique prédictive peut répondre à ces attentes en modélisant le comportement du système complexe territoire et en simulant sa réponse face à un événement majeur.

Le territoire peut quant à lui être modélisé selon les approches systémique et spatiale permettant :

- D'identifier les infrastructures critiques selon les différents échelons territoriaux de gestion de crise en France (Communal, Départemental, Zonal et National). L'ensemble des opérations réalisées par les IC du territoire (captage, production, stockage,...) sera pris en compte et l'étendue spatiale des services délivrés par ces IC sera identifiée. Le territoire, appelé « Territoire composé d'Activités Essentielles » (TcAE) sera explicité dans la suite.
- De mettre en évidence les interdépendances entre les infrastructures critiques et les interactions des infrastructures critiques avec la population du TcAE. La notion d'interdépendance évoquera par la suite à la fois les dépendances mutuelles entre les IC mais aussi entre les IC et la population.
- D'identifier les événements externes et internes susceptibles d'impacter les entités du TcAE. Dans ce travail, le vocable « perturbation » est utilisé comme synonyme de « événement ».

Par ailleurs, pour simuler le comportement du territoire suite à un événement majeur, il est nécessaire d'élaborer des scénarios de propagation afin de mesurer les impacts fonctionnels des IC et les impacts sur la population selon le service et la demande. Pour cela, la démarche méthodologie conduit à :

- Développer des scénarios à partir de l'étude des événements d'origine interne et externe au territoire et pouvant l'impacter;
- Configurer les scénarios avec les paramètres et caractéristiques intrinsèques de fonctionnement des IC, les caractéristiques de la population et les paramètres de service et demande ;

L'étude des résultats des pertes de service des IC impactés doit permettre d'évaluer la résilience systémique du Territoire composé d'Activités Essentielles.

L'analyse bibliographique a mis en évidence qu'il n'existe pas à notre connaissance de démarche méthodologique permettant une étude aussi intégrée du territoire et de ses infrastructures critiques (Figure 34). Aussi, une nouvelle démarche d'analyse des interdépendances spécifique à un TcAE est-elle proposée. Basée sur les approches systémique et spatiale, les aspects multi-échelles des territoires, intersectoriels et multifonctionnels des IC, les interdépendances entre les IC et la population caractérisent l'originalité de ce travail.

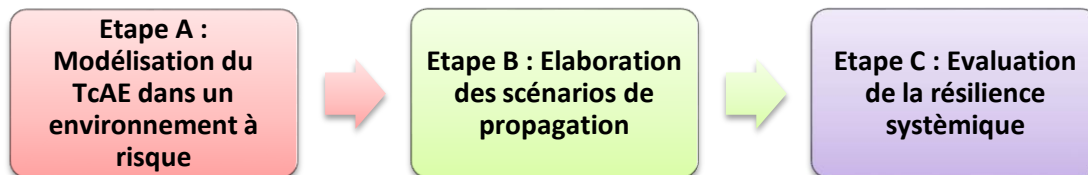


Figure 34 : Etapes de la méthodologie

Cette approche propose de s'appuyer sur les points forts des méthodologies étudiées dans la partie I, tout en complétant certaines des lacunes identifiées. Elle doit notamment permettre de :

- Tenir compte des interdépendances physiques, cybernétiques et géographiques entre les IC à partir de la description du territoire ;
- Tenir compte des défaillances initiales en cascade ou en cause commune. L'intérêt est de visualiser la propagation de l'impact d'un événement initial sur les infrastructures critiques ou la population et non de s'intéresser aux causes de la perturbation.
- Intégrer pour chaque infrastructure critique les données d'entrée des capacités de résilience concernant :
 - Les stocks, la capacité maximale de service, les ressources alternatives et les mesures de délestage/priorité ;
 - Le temps de remise en service des IC suite à un événement externe ;
- Mesurer les impacts fonctionnels des IC selon les paramètres de service et la demande ;
- Mesurer les pertes de disponibilité et de mobilité des individus de la population en fonction des pertes de service et traduire ces usagers impactés en individus actifs ne pouvant se rendre à leur travail. Il est nécessaire alors de posséder les informations sur les zones d'alimentation des services délivrés par les IC et la répartition des travailleurs sur le territoire suivant leur lieu de travail.

La méthodologie devrait pouvoir s'adosser sur les modélisations prédictives précédemment étudiées. Cependant :

- Le niveau d'abstraction des IC du modèle non-opérabilité entrée-sortie qui étudie de façon très macroscopique les interdépendances physiques entre les secteurs d'IC ne permet pas de retenir cette approche ;
- Les approches par les courbes/arbres mais aussi le modèle non-opérabilité entrée-sortie) ne permettent pas d'étudier
 - Ni les interdépendances géographiques entre les IC ;
 - Ni le déclenchement d'une perturbation en cause commune.
- La théorie des graphes est particulièrement utile pour l'étude des redondances entre les réseaux ce qui n'est pas l'objet premier de cette thèse qui a une vision plus macroscopique et intersectorielle. La théorie des graphes semble donc lourde et complexe à adapter à la spécificité de notre approche ;
- Enfin, la simulation orientée agent est un outil puissant. Parmi ses fonctionnalités, figurent l'apprentissage et l'autonomie des agents qui présentent un faible intérêt pour combler les attentes exposées. La mise en place d'un tel outil est également complexe, nécessitant un temps d'initiation important qui a paru difficilement compatible avec les exigences du travail pressenti.

Les outils de modélisation assez couramment utilisés dans la littérature ne permettent pas de répondre pleinement à notre problématique. Le choix s'est alors porté sur le formalisme de modélisation et de simulation ad-hoc qui semble être une approche pertinente pour couvrir l'ensemble des objectifs que nous nous sommes fixés. Ce formalisme est donc retenu pour l'élaboration de la méthodologie d'évaluation des conséquences d'une perturbation majeure sur un territoire constitué d'infrastructures critiques.

La mise en œuvre de cette nouvelle démarche méthodologique se base sur les concepts définis ci-après:

- La notion de territoire composé d'activités essentielles (TcAE) (descriptions structurelle et fonctionnelle) ;
- La notion de perturbation subie et émise par les constituants du TcAE qui permet de suivre sa propagation via les liens d'interdépendances (=scénarios de propagation) ;
- La mise en place du concept de demande des infrastructures critiques et de la population ;
- La mise en place des paramètres et caractéristiques de fonctionnement intrinsèques des infrastructures critiques et des caractéristiques de la population ;
- La notion de résilience systémique d'un Territoire composé d'Activités Essentielles (TcAE).

II-1.2. Définitions et description d'un Territoire composé d'Activités Essentielles

Avant de définir un TcAE et ses caractéristiques, une nouvelle terminologie est mise en place pour remplacer le terme d'infrastructure critique afin d'éviter la confusion de granulométrie existante. Trois niveaux de granulométrie sont déterminés selon une approche systémique (Figure 35) :

- Le système de systèmes est le territoire composé d'activités essentielles.
- Les systèmes sont les Chaînes Essentielles (CE) et la population. Une chaîne essentielle prend part à la réalisation d'une ou plusieurs missions de fourniture de services essentiels. Il s'agit par exemple des chaînes essentielles de fourniture d'électricité ou d'eau potable.
- Le dernier niveau concerne les composants. Il s'agit des Eléments Essentiels (EE) qui composent les chaînes Essentielles (exemple : raffinerie, ligne électrique THT, gare ferroviaire,...). Les éléments essentiels réalisent des fonctions essentielles ou d'association qui sont des actions ou des opérations (capter, produire,...). La population est constituée d'individus. C'est au sein de ce niveau granulométrique que sont analysés les liens d'interdépendances entre les éléments essentiels et ceux avec les individus.

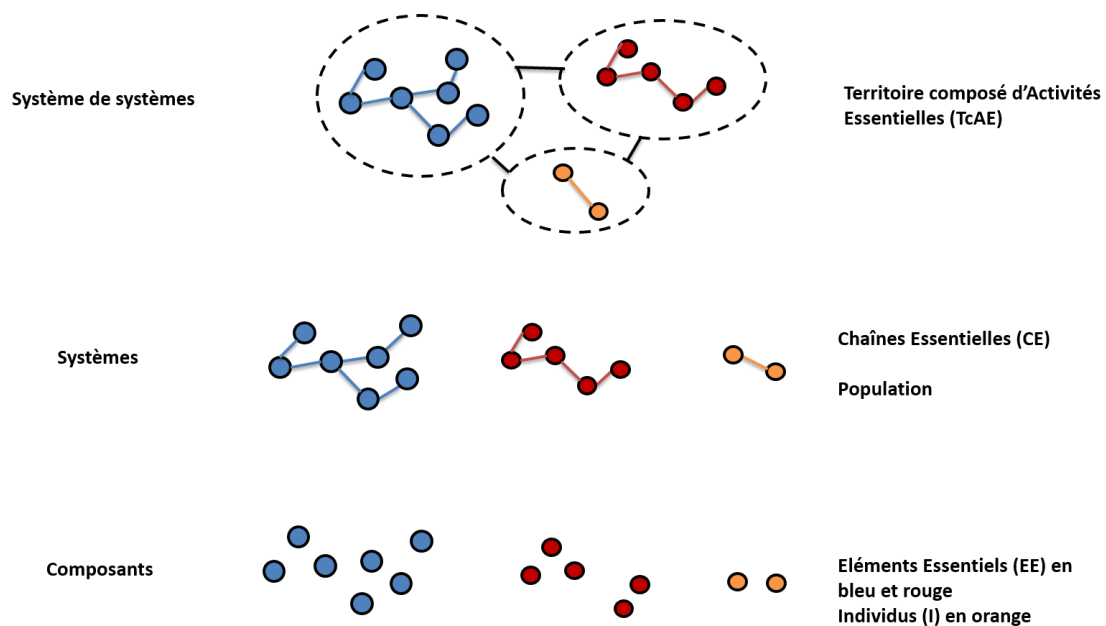


Figure 35 : Granulométrie du TcAE

Par ailleurs, quatre catégories de ressources (les éléments essentiels, les ressources de l'environnement du TcAE, les services des fonctions et la ressource humaine) sont décrites afin de faciliter la présentation de la notion de Territoire composé d'Activités Essentielles (TcAE) (Figure 36). D'autre part, dans le cadre de l'étude, ces ressources s'étudieront uniquement de manière quantitative.

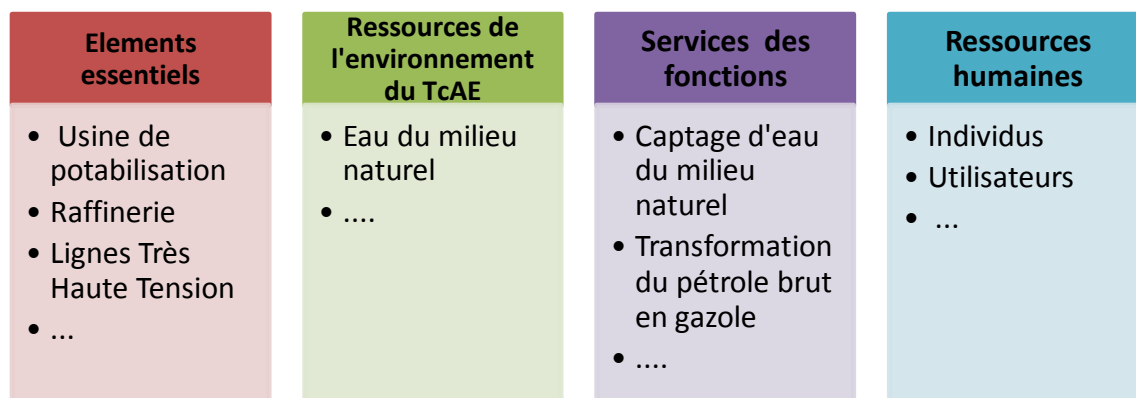


Figure 36 : catégories des ressources

i. Définition et caractéristiques d'un TcAE

La première partie de ce manuscrit sert de socle pour caractériser et poser les contours du territoire qu'est le « Territoire composé d'Activités Essentielles ». Ce concept innovant se doit d'intégrer les interdépendances entre les composants des chaînes essentielles et les groupes d'individus constituant la population du territoire. Ainsi, en se basant sur la définition des Secteurs d'Activités d'Importance Vitale (SAIV) et les caractéristiques d'un territoire (espace géographique, population, finalités), la définition proposée de TcAE est la suivante :

« Espace géographique d'activités essentielles borné par des frontières administratives, constitué d'Éléments Essentiels et d'individus interdépendants.

Le TcAE dispose d'une gouvernance ayant des aptitudes en matière de gestion des risques et des crises et a pour finalité de garantir sa sécurité globale ».

L'espace géographique d'activités essentielles englobe la portion terrestre du territoire prospecté et est délimité par des frontières administratives. Sept activités essentielles pour un TcAE sont retenues (Figure 37) à partir des douze Secteurs d'Activités d'Importance Vitale (une description de cinq activités essentielles est réalisée dans les annexes 4 à 8). Ces activités ont été sélectionnées du fait de l'influence et dépendance qu'elles possèdent entre elles et avec la population via les services délivrés mais aussi des informations que nous avons pu identifier dans la littérature pour dresser leur « portrait ».

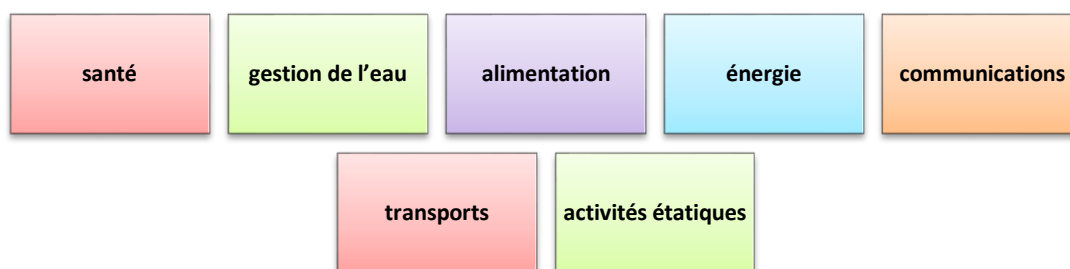


Figure 37 : Activités essentielles d'un TcAE

L'espace géographique d'activités essentielles comprend ici les chaînes essentielles

composées des éléments essentiels. Le TcAE est un système de systèmes multi-échelles. Il s'agit des échelles communale, départementale, zonale et nationale, présentant des qualités en matière de gestion de crise. La gouvernance est garantie par le maire à l'échelle communale, les préfets à l'échelle départementale et zonale et les ministres ou le premier ministre à l'échelle nationale.

La population du TcAE désigne une partie des usagers des services (=utilisateurs) délivrés par les composants des chaînes essentielles mais aussi les individus actifs nécessaires au bon fonctionnement des éléments essentiels. Par exemple, les utilisateurs ont besoin d'un service de distribution d'électricité. D'autre part, les individus actifs font fonctionner un centre hospitalier (médecins, infirmiers,...).

Des fonctions vitales contribuent à assurer la sécurité globale du TcAE et sont extraites de la définition des Secteurs d'Activités d'Importance Vitale. Trois fonctions vitales communes à l'ensemble des TcAE sont dénombrées :

- Fonction 1 (F1) : Satisfaire les besoins essentiels à la vie de la population ;
- Fonction 2 (F2) : Assurer le fonctionnement de l'économie ;
- Fonction 3 (F3) : Préserver la sécurité intérieure du TcAE suite à une perturbation majeure ;

La première fonction vitale se base sur la définition des besoins essentiels de l'Organisation des Nations Unies (ONU). L'ONU recense cinq besoins essentiels (nutrition, santé, logement, éducation, travail) dans les objectifs du Millénaire pour le développement (ONU, 2013). Dans le cadre de cette thèse, la nutrition et la santé sont retenues comme besoins essentiels à la vie des populations. L'étude s'intéressera uniquement aux aliments de première nécessité (produits non-périssables et consommant peu d'eau, consommables en tant de crise quelle qu'elle soit), l'accès à l'eau potable et à l'assainissement. Les produits essentiels de santé (médicaments, vaccins,...) et l'accès aux soins sont assimilés aux besoins essentiels de santé.

L'activité économique d'un territoire est devenue incontournable à sa survie. Pour cela, les transports, l'énergie (électricité, produits finis du pétrole, gaz naturel), les communications sont indispensables. Les activités de « finance » ne sont pas considérées dans le projet car nous ne disposons pas de connaissances suffisantes sur ce secteur. Le secteur « industrie » n'est pas retenu en tant que tel dans la mesure où les autres secteurs sélectionnés intègrent déjà une part importante de ces activités industrielles.

La troisième fonction vitale consiste à assurer la sécurité intérieure du territoire par les activités étatiques. Les activités étatiques comprennent les organes de gouvernance du territoire, responsables entre autres de l'application des dispositifs élaborés en cas de crise comme le Plan Communal de Sauvegarde (PCS) pour les territoires à l'échelle communale ou le plan d'Organisation de la Réponse de Sécurité Civile (ORSEC) pour les territoires à l'échelle départementale ou zonale.

Le Territoire composé d'Activités essentielles met en avant plusieurs chaînes essentielles (CE), composées d'éléments essentiels interdépendants entre eux et avec les individus de la population. Ces propos permettent d'établir la représentation organique du Territoire composé d'Activités Essentielles (Figure 38).

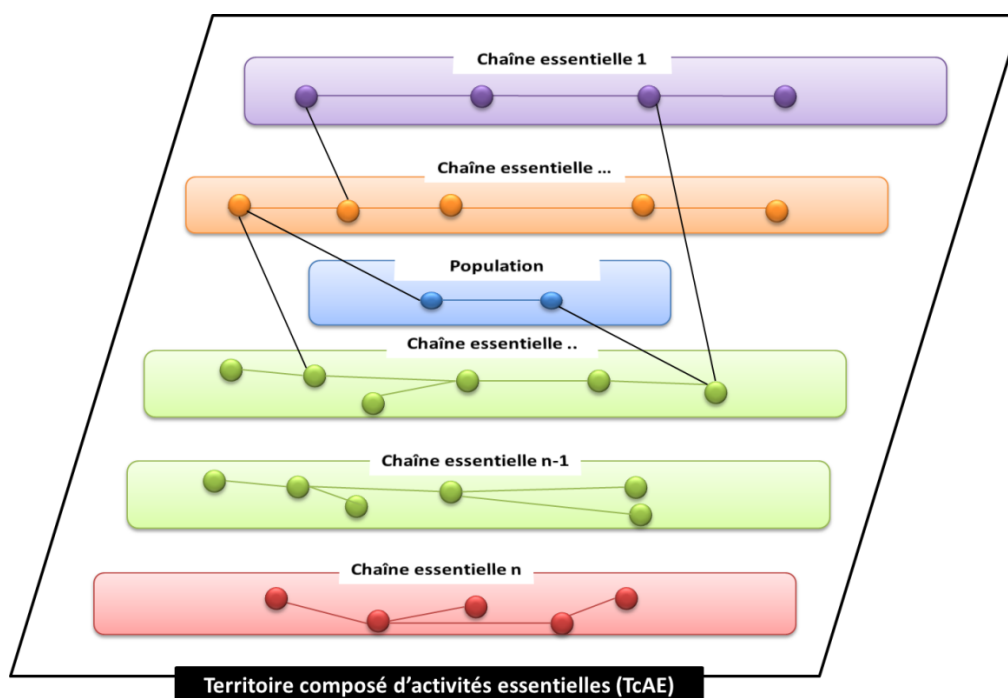


Figure 38 : Représentation organique du TcAE

ii. Chaînes essentielles et description fonctionnelle

Dix-sept chaînes essentielles (CE) composent un Territoire composé d'Activités Essentielles. Ces chaînes essentielles sont des « réseaux » comme le réseau d'électricité, le réseau d'eau potable, ou encore le réseau des produits essentiels de santé (Tableau 6).

Chaîne essentielle d'eau potable	Chaîne essentielle d'électricité
Chaîne essentielle des eaux usées	Chaîne essentielle de gaz naturel
Chaîne essentielle des soins et des produits essentiels de santé	Chaîne essentielle des produits finis du pétrole
Chaîne essentielle de la réponse de l'Etat en cas de perturbation majeure	Chaîne essentielle transport routier
Chaîne essentielle des aliments de première nécessité	Chaîne essentielle transport ferroviaire
Chaîne essentielle des télécommunications filaires	Chaîne essentielle transport aérien
Chaîne essentielle des télécommunications mobiles	Chaîne essentielle transport fluvial
Chaîne essentielle des télécommunications internet	Chaîne essentielle transport urbain
Chaîne essentielle des télécommunications satellite	

Tableau 6 : listes des chaînes essentielles

D'autre part, une ou plusieurs chaînes essentielles réalisent des missions de fourniture de services essentiels pour leur fonctionnement propre ou la population. Six catégories permettent de classer ces vingt et une missions. On dénombre :

- Les missions d'approvisionnement de l'eau potable, des produits de santé, des produits d'alimentation de première nécessité, de l'électricité, du gaz naturel, des essences, du gazole, du fioul domestique et du carburacteur. Les listes des produits de santé essentiels et des aliments de première nécessité n'ayant pas été trouvées dans la littérature, ils sont considérés ici comme des produits uniques. Les quatre produits finis du pétrole sélectionnés (essences, gazole, fioul domestique, carburacteur) font partie des ressources contenues dans les stocks stratégiques en France. Le pétrole brut qui fait pourtant partie des produits stratégiques stockés n'est pas inclus dans cette liste du fait qu'il n'est pas un produit fini. Le fioul lourd n'est également pas retenu car ce produit n'est pas une ressource stockée par la Société anonyme de gestion de stocks de sécurité (SAGESS) (voir annexe 7) ;
- La mission de traitement des eaux usées ;
- Les missions de pilotage de la fourniture d'électricité, d'eau potable, du gaz naturel et d'assainissement des eaux usées.
- La mission d'organisation et de coordination de la gouvernance du TcAE suite à une perturbation majeure ;
- La mission des soins à la population ;
- Les missions des services de mobilité de la population à partir des modes routier, urbain, ferroviaire, fluvial et aérien. Le mode maritime n'est pas pris en compte dans l'étude. Les missions de pilotage de la fourniture de services de mobilité de la population par les différents modes de transport ne sont également pas retenues.

Les chaînes essentielles de transport de fret (produits finis du pétrole, produits essentiels de santé, produits alimentaires de première nécessité) et des télécommunications participent à la réalisation de plusieurs de ces missions du fait du rôle d'échanges d'information et de déplacement du fret qu'elles réalisent.

Missions des Chaines Essentielles (CE)
Mission 1 (M1) : Fournir le service essentiel d'approvisionnement d'eau potable
Mission 2 (M2) : Fournir le service essentiel de transmission des informations de pilotage de la fourniture de l'eau potable
Mission 3 (M3) : Fournir le service essentiel d'assainissement des eaux usées
Mission 4 (M4) : Fournir le service essentiel de transmission des informations de pilotage de l'assainissement des eaux usées
Mission 5 (M5) : Fournir le service essentiel des soins à la population
Mission 6 (M6) : Fournir le service essentiel d'approvisionnement des produits essentiels de santé
Mission 7 (M7) : Fournir le service essentiel de transmission des informations de l'organisation et coordination de la réponse de l'Etat en cas d'une perturbation majeure
Mission 8 (M8) : Fournir le service essentiel d'approvisionnement de l'électricité
Mission 9 (M9) : Fournir le service essentiel de transmission des informations de pilotage de l'électricité
Mission 10 (M10) : Fournir le service essentiel d'approvisionnement de gaz naturel
Mission 11 (M11) : Fournir le service essentiel de transmission des informations de pilotage du gaz naturel
Mission 12 (M12) : Fournir les services essentiels d'approvisionnement des essences
Mission 13 (M13) : Fournir les services essentiels d'approvisionnement du gazole
Mission 14 (M14) : Fournir les services essentiels d'approvisionnement du fioul domestique
Mission 15 (M15) : Fournir les services essentiels d'approvisionnement du carburéacteur
Mission 16 (M16) : Fournir les services essentiels de mobilité de la population par le mode urbain
Mission 17 (M17) : Fournir les services essentiels de mobilité de la population par le mode routier
Mission 18 (M18) : Fournir les services essentiels de mobilité de la population par le mode ferroviaire
Mission 19 (M19) : Fournir les services essentiels de mobilité de la population par le mode aérien
Mission 20 (M20) : Fournir les services essentiels de mobilité de la population par le mode fluvial
Mission 21 (M21) : Fournir le service essentiel de provisions des aliments de première nécessité

Tableau 7 : missions des chaînes essentielles du TcAE

iii. Eléments essentiels et description fonctionnelle

Les chaînes essentielles sont composées d'éléments essentiels localisés dans le TcAE. Les éléments essentiels (EE) regroupent un ou plusieurs éléments considérés comme :

- Des éléments dits nœuds lorsqu'il s'agit d'un « établissement », « une installation » ou un « ouvrage » (d'après SGDSN, 2014). Une station de production d'eau potable ou un poste de transformation électrique sont des éléments nœuds ;
- Des éléments dits arcs lorsqu'il s'agit de « lignes », « canalisations », « conduites » ou « voies ». Une canalisation d'eau potable ou un gazoduc sont des éléments arcs.

D'autre part, les éléments essentiels réalisent une ou plusieurs fonctions. Ces dernières sont des opérations ou actions comme « Traiter eau du milieu naturel » pour une station de production d'eau potable, « Stocker l'eau potable » pour un réservoir d'eau potable et « Transporter l'eau potable » pour un ensemble de canalisations de transport d'eau potable et nœuds d'interconnexion.

Des typologies des éléments et des fonctions ont été établies (des extraits sont présentés en annexes 11 et 12). Elles permettent de construire le modèle du TcAE. Elles ont été élaborées à partir d'une étude bibliographique des activités essentielles et de la Nomenclature des Activités Françaises (NAF). Une liste de verbes d'action possibles est proposée afin d'illustrer des exemples de fonctions réalisées par les éléments essentiels selon les secteurs primaire, secondaire et tertiaire (Tableau 8). Par ailleurs, ces verbes actions ne sont pas exclusifs à un secteur du fait que le périmètre du secteur tertiaire est défini par rapport aux deux premiers secteurs (INSEE, 2014).

Secteurs	Verbes d'actions associés
Primaire	explorer, cultiver, capter, extraire
Secondaire	produire, transformer,
Tertiaire	transporter, déplacer, distribuer, comprimer, traiter, stocker, piloter, contrôler...

Tableau 8 : Liste de verbes d'actions des fonctions

De plus, les fonctions délivrent des services, appelés sortie, à étendue spatiale variable (=zone d'alimentation). Deux types de fonctions existent. Un élément essentiel réalise une Fonction Essentielle (FE) alors qu'un regroupement d'éléments essentiels accomplit une Fonction d'Association (FA). Les fonctions d'association sont construites pour faciliter l'analyse de la propagation en cascade d'un évènement. Par ailleurs, un élément essentiel (EE) peut satisfaire plusieurs fonctions essentielles ou d'association. C'est par exemple le cas d'une raffinerie qui réalise quatre opérations distinctes (Transformer le pétrole brut en essences/gazole/fioul domestique/carburacteur).

A partir des notions d'éléments essentiels et de fonctions essentielles ou d'association, un nouveau formalisme s'appuyant sur le diagramme issu de la méthode d'analyse fonctionnelle «Structured Analysis and Design Technique (SADT)» (Augusto, 2012) est mis en place (Figure 39). Ce formalisme présente la particularité de représenter la circulation des ressources à travers les descriptions organique et fonctionnelle en se concentrant sur les ressources entrantes et sortantes des

éléments essentiels et fonctions essentielles ou d'association.

Les fonctions essentielles ou d'association utilisent des entrées alors que les éléments essentiels utilisent des supports. Les entrées ou supports sont des services issus des sorties d'autres fonctions essentielles ou d'association, des individus actifs ou des ressources de l'environnement du TcAE. La particularité de l'identification des supports repose sur le fait que ces derniers sont des causes communes de défaillances potentielles pour les éléments essentiels. Enfin, les fonctions essentielles ou d'association utilisent des contraintes (Figure 39) qui sont des informations de gouvernance ou de pilotage.

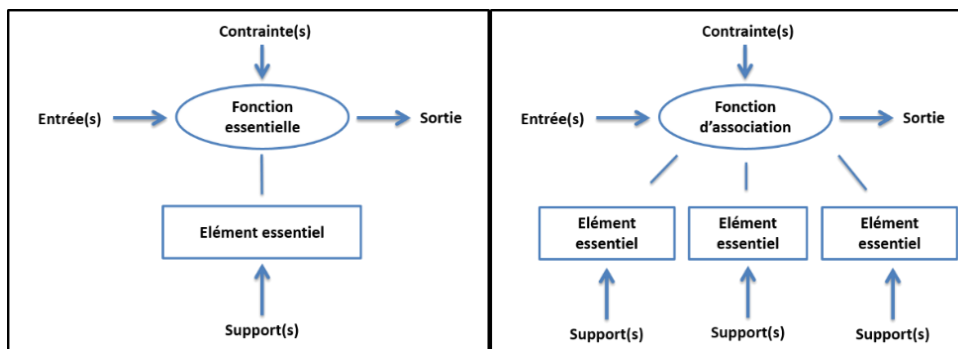


Figure 39 : Formalisme d'un EE/FE ou FA

A titre d'exemple, un composant de la chaîne d'eau potable illustre ce formalisme (Figure 40). Une station de captage réalise la fonction essentielle (FE) « capter l'eau du milieu naturel » qui utilise en entrée « l'eau du milieu naturel » et fournit en sortie (Si) le service « captage eau du milieu naturel ». Dans le cas où il existe deux stations de captage 1 et 2 du réseau d'eau potable qui réalisent chacune l'action « capter eau du milieu naturel » en utilisant l'eau du milieu naturel en entrée et qui alimentent en sortie les mêmes destinataires, alors une fonction d'association (FA) « capter eau du milieu naturel » est définie. Les fonctions essentielles ou d'association (FE ou FA) utilisent la contrainte « transmission informations centre de pilotage ». Les stations de captage d'eau du milieu naturel utilisent les supports de « distribution d'électricité ».

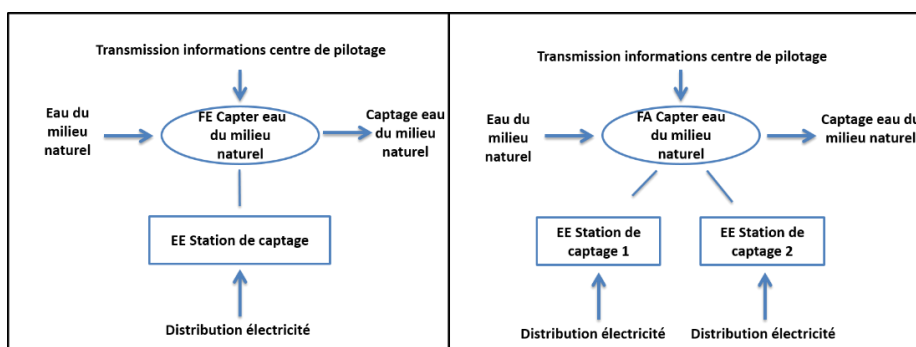


Figure 40 : Illustration formalisme EE/FE ou FA

iv. Individus

Les individus (I) composent la population du TcAE. Ces individus sont dits actifs lorsqu'ils sont employés des éléments essentiels et « inactifs » dans le cas contraire.

Ils sont localisés dans des zones de références (ZR) du TcAE. Par ailleurs, les individus sont également des utilisateurs (U) qui ont recours à des sorties des fonctions essentielles ou d'association ou des ressources entrantes de l'environnement du TcAE.

Afin d'étudier d'une part l'influence des sorties des fonctions essentielles ou d'association sur les utilisateurs et d'autre part la dépendance des éléments essentiels aux individus actifs, un nouveau formalisme « utilisateur » est mis en place. Des utilisateurs d'une zone d'alimentation ont besoin d'entrées et délivrent en sortie des individus actifs des éléments essentiels de différentes zones de référence (Figure 41).



Figure 41 : Formalisme utilisateur

v. Représentation du « TcAE »

A partir des propos précédents, il est possible de proposer une nouvelle représentation du TcAE à partir des descriptions organique et fonctionnelle (Figure 43). Le système de systèmes TcAE est ouvert permettant l'entrée et la sortie des ressources de l'environnement (=ressources externes entrantes et sortantes).

Le TcAE est composé des chaînes essentielles (CE) et de la population. Les CE et la population se composent respectivement des éléments essentiels (EE) et des individus (I). Les éléments essentiels réalisent une ou plusieurs fonctions essentielles ou d'association. Un EE utilise des supports tandis qu'une fonction essentielle ou d'association utilise des entrées, des contraintes et délivre une sortie ou service. D'autre part, les individus sont aussi des utilisateurs qui reçoivent des entrées et délivrent des sorties correspondant à un nombre d'individus actifs travaillant pour un élément essentiel.

Au final, les ressources externes entrantes, les sorties des fonctions essentielles ou d'association et des utilisateurs sont les entrées, contraintes ou supports des autres FA ou FE, EE, U ou des ressources externes sortantes du TcAE.

Par ailleurs, une séquence fonctionnelle désigne une succession de fonctions essentielles ou d'association réalisées par différents éléments essentiels décomposant une mission réalisée par les chaînes essentielles. Le(s) service(s) délivré(s) par la (ou les) dernière(s) fonction(s) essentielle(s) ou d'association de la séquence est (sont) adressé(s) à plusieurs usagers. Il s'agit à la fois des utilisateurs mais aussi des éléments essentiels, des fonctions essentielles ou d'association ou l'environnement du TcAE. Les étendues spatiales des services délivrés sont appelées zones d'alimentation (ZA).

Par exemple, un extrait de la séquence fonctionnelle associée à la mission de fourniture du service essentiel d'approvisionnement d'eau potable est présenté Figure 42. Le service « Distribution d'eau potable » est desservi aux usagers. Il peut s'agir des utilisateurs et d'un centre hospitalier.

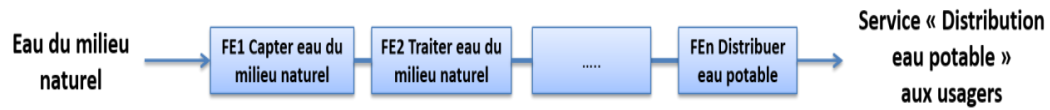


Figure 42: illustration d'une séquence fonctionnelle

La mise en place de cette représentation du TcAE conduit alors à faciliter le suivi d'une propagation d'une perturbation majeure impactant le Territoire composé d'Activités Essentielles.

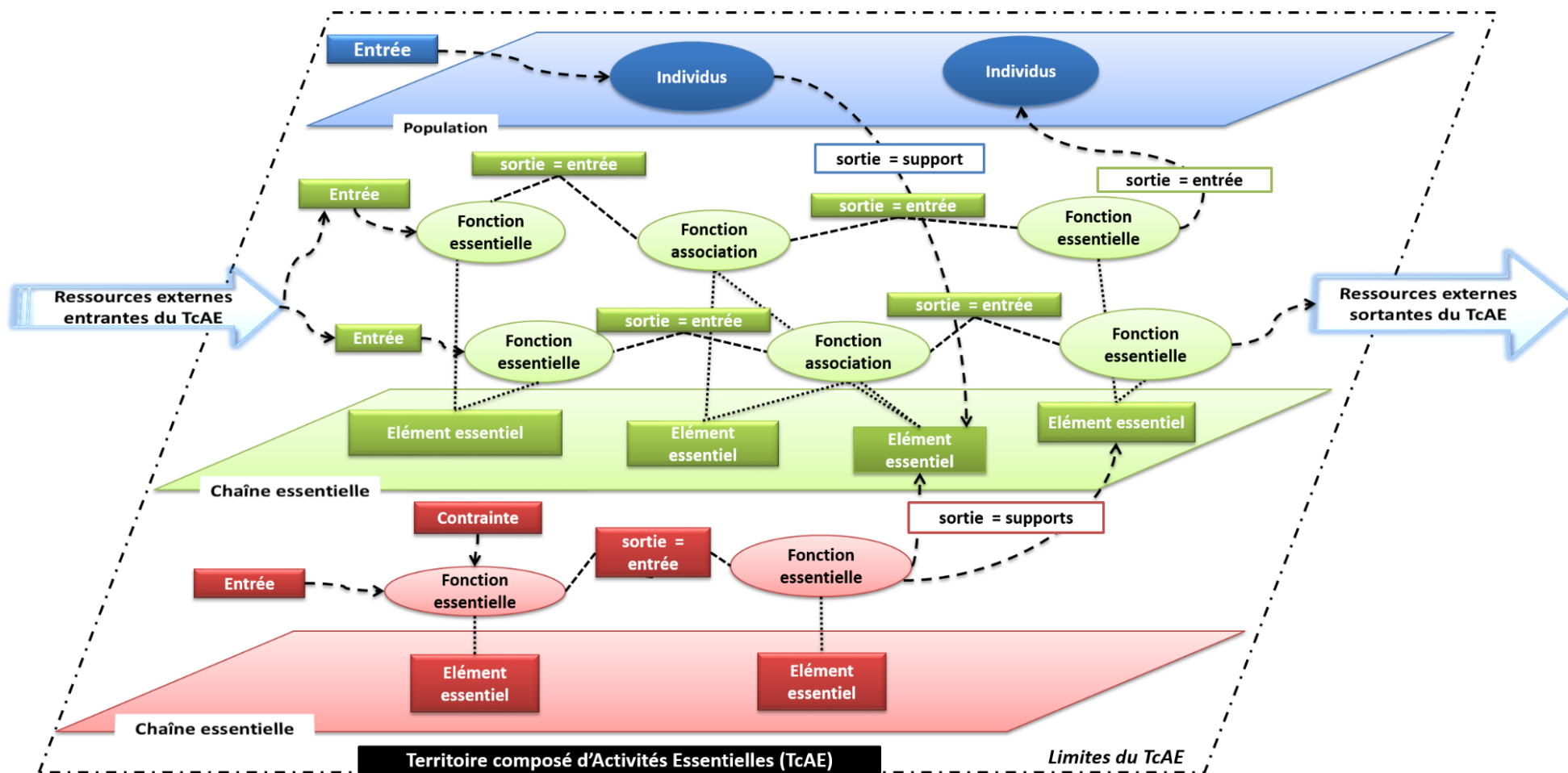


Figure 43 : Représentation du TcAE

II-1.3. Propagation d'une perturbation majeure au sein du TcAE

Le modèle du TcAE est construit dans le but d'étudier le comportement du Territoire composé d'Activités Essentielles (TcAE) soumis à une perturbation majeure. A ce titre, les événements initiaux sont assimilés à des perturbations majeures pour le TcAE tandis que les événements en cascade dus aux liens d'interdépendances sont appelés perturbation.

Par ailleurs, les finalités du projet (planification des mesures de continuité et rétablissement d'activité, mesures de traitement des risques) incitent à caractériser la perturbation majeure afin de détailler les situations rencontrées. Ainsi, il est considéré qu'une perturbation majeure conduit la gouvernance du TcAE à organiser et à coordonner la continuité d'activité et la remise en service en raison de la mise en péril des fonctions vitales (adaptation d'après la définition des crises de grande ampleur donnée par Dautun, 2007). Cela se traduit de manière concrète par :

- Un événement majeur endogène ou exogène au TcAE avec un potentiel de danger élevé ;
- Un ou plusieurs éléments essentiels de chaînes essentielles différentes et une ou plusieurs fonctions essentielles ou d'association de séquences fonctionnelles différentes impactés directement et/ou indirectement ;
- Un nombre d'individus impactés élevé ;
- Une durée de l'événement initial de plusieurs heures à plusieurs jours ;
- La nécessité de mutualiser des moyens matériels ou humains pour assurer la continuité d'activité et la remise en service. Les règles de priorité se substitueront aux règles économiques de marché.

D'autre part, il convient d'associer les ressources et les fonctions essentielles ou d'association du TcAE à cette caractérisation de la notion de perturbation majeure.

Les éléments essentiels, les fonctions essentielles ou d'association et les individus subissent des perturbations majeures qui peuvent être internes ou externes au TcAE (Figure 45). Ils sont également impactés par des perturbations qui sont uniquement internes en raison des liens d'interdépendances.

Les quatre catégories suivantes de perturbations externes sont susceptibles d'impacter le TcAE :

- Catastrophe naturelle/environnementale/sanitaire ;
- Accident industriel ;
- Menaces intentionnelles ;
- Une perte ou une surabondance d'une ressource de l'environnement du TcAE utilisée comme entrée ou contrainte d'une FE ou FA et support d'un EE.

Une typologie plus approfondie des événements externes est proposée pour les trois premières catégories (Figure 44). Cette typologie non-exhaustive tient compte des principaux aléas pouvant survenir en France métropolitaine (COFELY INEO *et al.*, 2013 ; SGDSN, 2014). Par ailleurs, ces événements impactent les éléments essentiels et des « personnes » (P) qui sont des individus de la population du TcAE. Le nombre de personnes touchées par une perturbation externe influence le nombre d'individus actifs des éléments essentiels pour les différentes zones de référence. Une zone d'impact (ZI) caractérise ces événements externes sur les personnes (P).

Les perturbations internes subies sont dues à :

- Une perte ou une surabondance d'entrée (sauf ressource de l'environnement

du TcAE) ;

- Une perte de support (sauf ressource de l'environnement du TcAE) ;
- Une perte de contrainte (sauf ressource de l'environnement du TcAE) ;
- Un flux de danger émis par un élément essentiel ;
- Une perte d'activité d'un élément essentiel réalisant une fonction essentielle ou d'association.

Catégories de perturbation	Perturbations externes	Eléments essentiels	Personnes
Catastrophes naturelles, environnementales ou sanitaires	Phénomènes météorologiques graves : foudre	X	
	Tempête	X	X
	Inondation	X	X
	Séisme	X	X
	Tsunami	X	X
	Températures extrêmes : verglas	X	X
	Incendie de forêt	X	X
	Pandémie		X
	Effet thermique	X	X
	Effet surpression	x	X
Accidents industriels	Effet missile	X	X
	Effet toxique		X
	Effet des irradiations		X
Menaces intentionnelles	Acte de malveillance	X	
	Terrorisme	X	X

Figure 44 : Typologie des perturbations externes TcAE

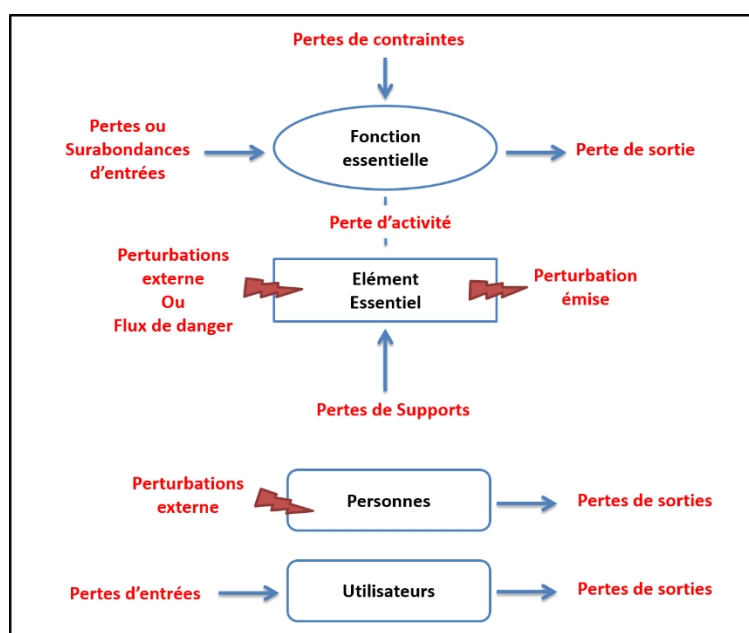


Figure 45 : Origine des perturbations

Dans le même temps, les perturbations externes ou internes subies sont susceptibles d'engendrer ensuite :

- un flux de danger pour les autres éléments essentiels.
- une perte de sortie pour les fonctions essentielles ou d'association et des pertes de sorties pour les utilisateurs et les personnes.

Ces perturbations se propagent alors à l'intérieur ou l'extérieur du TcAE.

Si plusieurs éléments essentiels réalisent une même fonction d'association, les perturbations externes et internes subies et émises par les différents éléments essentiels sont distinctes.

Au final, ce sont les liens existant entre les ressources et fonctions essentielles ou d'association du TcAE qui propagent les effets d'une perturbation majeure. En effet, les sorties des fonctions essentielles ou d'association, des utilisateurs deviennent les entrées, les contraintes ou les supports des éléments essentiels ou d'autres fonctions essentielles ou d'association et utilisateurs. D'autre part, un élément essentiel est une source de danger pouvant émettre un flux de danger sur d'autres éléments essentiels à proximité.

Les perturbations majeures externes et les liens existants du TcAE permettent ainsi de construire des scénarios de propagation.

Configurer ces scénarios est alors indispensable pour suivre la propagation des effets de la perturbation majeure dans le temps et l'espace. Les paramètres de demande et de service ainsi que des paramètres et caractéristiques intrinsèques de fonctionnement des individus, des éléments essentiels et fonctions essentielles ou d'association sont introduits et expliqués ci-après.

II-1.4. Paramètres de demande et service

La propagation d'un évènement dans le cas d'une perte ou surabondance d'une ressource se fait selon la différence entre les valeurs de demande et de service.

La demande des entrées et des sorties des fonctions essentielles ou d'association est estimée selon la demande dite amont ou aval des usagers du service délivré par la dernière fonction de la séquence fonctionnelle. La demande des usagers correspond au besoin en :

- entrées des utilisateurs ou des fonctions essentielles ou d'association ;
- contraintes des fonctions essentielles ou d'association ;
- supports des éléments essentiels ;
- ressources de l'environnement du TcAE.

La demande dite aval ou amont des usagers dépend de la catégorie de la mission associée à la séquence fonctionnelle.

En effet, les séquences fonctionnelles caractérisées par une demande aval correspondent aux missions d'approvisionnement des ressources d'eau potable, d'électricité, de gaz naturel, des essences, du gazole, du fioul domestique, du carburéacteur, des produits essentiels de santé et de première nécessité mais aussi aux missions de pilotage des ressources ou d'organisation du TcAE en cas de crise. Dans ce cas, la demande provient des usagers qui reçoivent le service de la dernière fonction de la séquence (Figure 46). Cette demande est alors envoyée à l'ensemble des fonctions essentielles ou d'association de la séquence.

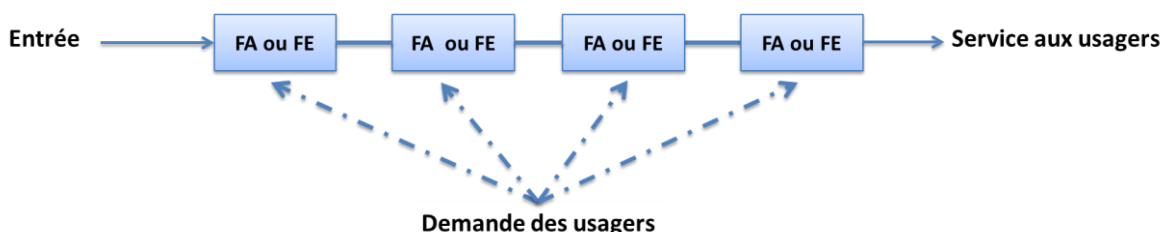


Figure 46 : Séquence fonctionnelle avec une demande aval

La mission de fourniture de service essentiel d'approvisionnement en eau potable associe une séquence fonctionnelle avec une demande aval (Figure 47). Cette demande aval (demandes des utilisateurs, centres hospitaliers,...) est adressée à l'ensemble des fonctions essentielles ou d'association de la séquence fonctionnelle.

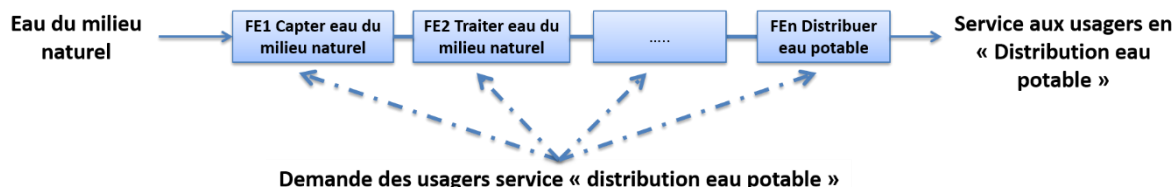


Figure 47 : Illustration séquence fonctionnelle "fourniture eau potable " avec une demande aval

Par ailleurs, dans le cas des services indénombrables tels que les services d'information, cette ressource est considérée de manière binaire (0 ou 1).

D'autre part, la demande amont des usagers concerne les séquences fonctionnelles

associées aux missions de fourniture des services essentiels de soins à la population, mobilité de la population et d'assainissement des eaux usées (Figure 48). Le service est délivré par rapport à une demande amont qui correspond à la valeur d'entrée de la première fonction essentielle ou d'association de la séquence fonctionnelle. Les individus du TcAE sont les usagers uniques de ces services.



Figure 48 : Séquence fonctionnelle avec une demande amont

La demande amont provient des utilisateurs du TcAE qui veulent par exemple se déplacer ou se faire soigner dans le cas des séquences fonctionnelles associées aux missions de fourniture des services essentiels de soins à la population ou de mobilité de la population. Un autre exemple de demande amont concerne les eaux usées des utilisateurs à traiter (Figure 49).

Le service réalisé en bout de chaîne est alors fourni aux utilisateurs (nombre d'individus soignés ou déplacés, quantité d'eaux traitées).



Figure 49 : Illustration séquence fonctionnelle "assainissement des eaux usées " avec une demande amont

D'autre part, des coefficients de conversion peuvent être mis en place afin de traduire la demande réelle des usagers. En effet, la demande des entrées et sorties n'est pas forcément identique à celle des usagers. Par exemple, une demande des usagers en service « distribution de gazole » doit être convertie en demande adéquate de pétrole brut pour les fonctions essentielles ou d'association des raffineries. De même, la demande en « distribution eau potable » des usagers ne correspond pas à la demande en eau captée dans le milieu naturel.

Enfin des coefficients de demande sont introduits afin de tenir compte des branches existantes dans une séquence fonctionnelle. En effet, ces branches répartissent la demande des usagers au travers des opérations réalisées (Figure 50).

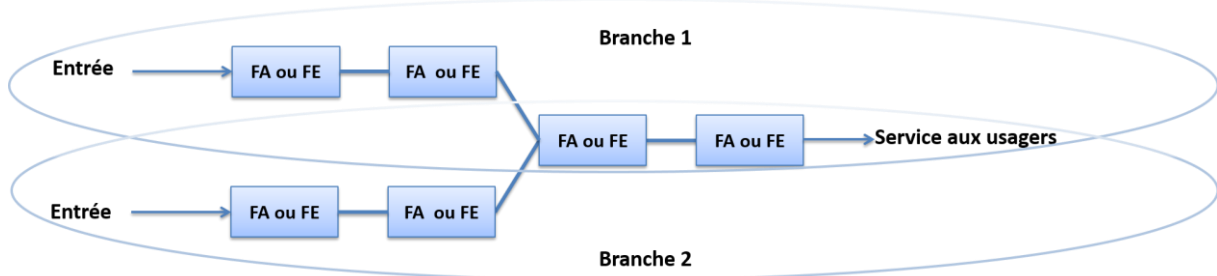


Figure 50 : Branches des séquences fonctionnelles

II-1.5. Caractéristiques des composants des chaînes essentielles et de la population

Afin de suivre la propagation d'une perturbation majeure sur le TcAE, les paramètres intrinsèques et caractéristiques de fonctionnement des éléments essentiels et de leurs fonctions essentielles ou d'association sont présentés. Puis, les individus du TcAE sont caractérisés via leur intégrité, disponibilité et mobilité.

II-1.5.1 Paramètres intrinsèques et caractéristiques de fonctionnement des éléments essentiels et fonctions

Les paramètres intrinsèques et caractéristiques de fonctionnement des éléments essentiels et de leurs fonctions essentielles ou d'association sont issus d'une part des données d'entrée possibles des capacités de résilience mises en évidence lors de la première partie et d'autre part des besoins de maintenance préventive.

Cinq paramètres et caractéristiques d'absorption et de remise en service sont associés au formalisme élément essentiel/fonction essentielle ou d'association (Figure 51). Il s'agit :

- Des stocks utilisés lorsque la demande de sortie de la fonction ne peut être satisfaite. Il est considéré que les stocks de ressources se font uniquement pour les sorties des fonctions. Il s'agit par exemple des réserves d'eau potable dont peuvent disposer les FE ou FA des stations de production d'eau potable ou encore des stocks de produits finis du pétrole pour les fonctions des raffineries ;
- Des ressources alternatives utilisées lorsque la fourniture d'un support est interrompue. Ces ressources sont traduites en durée d'autonomie pour l'élément essentiel face à l'interruption d'un support. Par exemple, un établissement de santé dispose de groupes électrogènes et des réserves de carburants dimensionnés pour faire face à une interruption électrique d'une durée de 48 heures ;
- De la capacité maximale de service des fonctions essentielles ou d'association utilisée pour évaluer la fourniture de sortie maximale. Par exemple, la capacité maximale de sortie de la fonction essentielle « capter eau du milieu naturel » est de 650 m³/h ;
- Des règles de priorité de service permettant de hiérarchiser les clients prioritaires par rapport à d'autres. Ces règles concernent les sorties dénombrables délivrées par les fonctions essentielles ou d'association. Par exemple, la sortie de la fonction « Distribuer l'eau potable » dessert prioritairement un centre hospitalier par rapport à des utilisateurs du TcAE. Ces règles sont appliquées à chaque pas de temps de la simulation en cas d'une pénurie de ressources.
- Du temps de remise en service des éléments essentiels lorsque la perturbation majeure est d'origine externe et issue des catégories catastrophes naturelles/ environnementales/sanitaires, accidents industriels ou menaces intentionnelles. Il tient compte du temps d'arrivée des équipes de réparation, des durées de réparation et redémarrage.

Par ailleurs, ces paramètres s'appliquent lorsque les éléments essentiels et leurs fonctions sont en mode de fonctionnement d'exploitation, en mode dégradé ou à l'arrêt. Un paramètre supplémentaire de disponibilité permet de tenir compte du fonctionnement partiel ou nul en raison d'actions de maintenance préventive. Par exemple, si une centrale nucléaire contient quatre réacteurs dont deux sont en arrêt de tranche, la disponibilité de l'élément essentiel est de 50%.

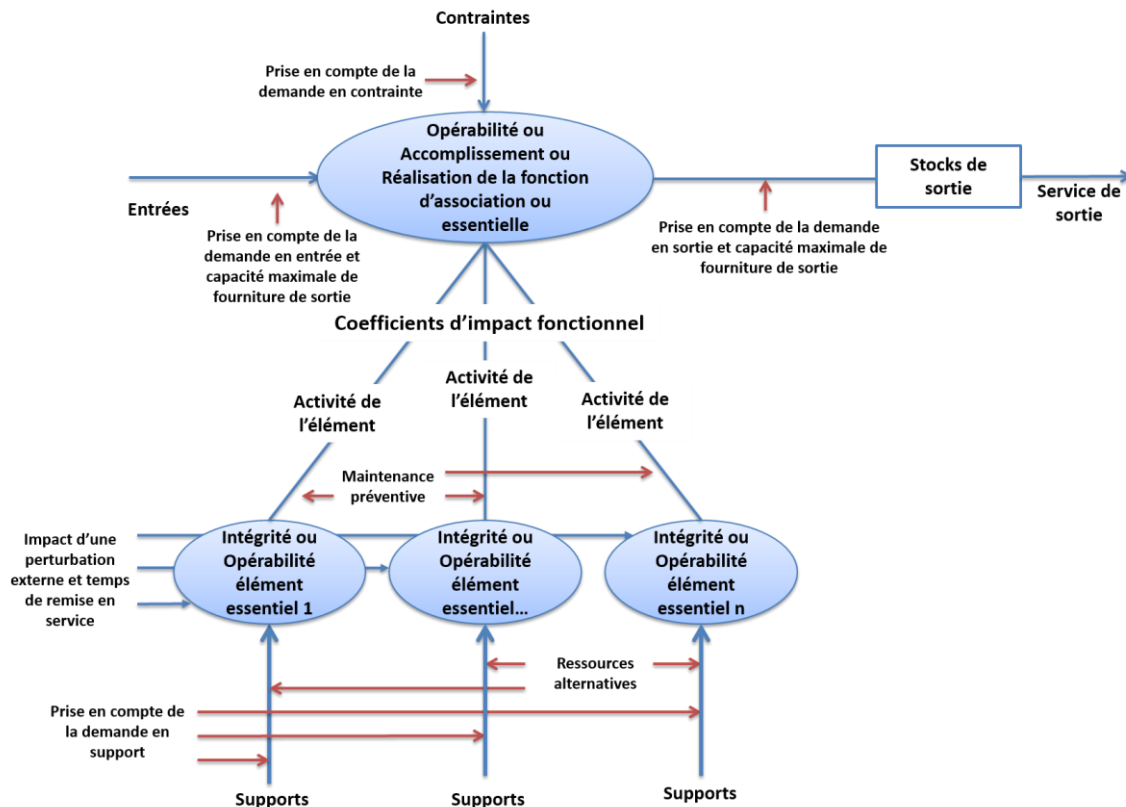


Figure 51 : Paramètres des éléments essentiels et des fonctions essentielles ou d'association

Ces données d'entrée adjointes aux paramètres de demande et service identifiés précédemment permettent d'évaluer :

- l'opérabilité des éléments essentiels selon la demande et la valeur de support reçu;
 - l'intégrité de l'élément essentiel estimée en fonction de la valeur d'impact de la perturbation d'origine externe (typologies des perturbations externes, Figure 44) ;
 - l'opérabilité des fonctions essentielles ou d'association selon la demande et la valeur d'entrée reçue.
- Dans le cas des séquences fonctionnelles avec demande amont, la valeur d'entrée sera égale soit à la demande soit à la capacité maximale de service de la fonction essentielle ou d'association dans le cas où la demande est supérieure à cette valeur ;
- la réalisation des fonctions essentielles ou d'association selon la demande et la valeur de contrainte reçue.

Par ailleurs, il est également possible d'estimer l'accomplissement des fonctions essentielles ou d'association au travers de l'activité de son élément essentiel et du coefficient d'impact fonctionnel. L'activité d'un élément essentiel est estimée en fonction de sa valeur d'opérabilité ou d'intégrité et de sa disponibilité. Cette valeur d'activité va influencer l'accomplissement de la fonction essentielle ou d'association selon un coefficient d'impact fonctionnel déterminant le poids (en %) que possède l'élément essentiel dans la fourniture de service de la fonction essentielle ou d'association qu'il réalise.

II-1.5.2 Les individus de la population

Les utilisateurs (U) du TcAE sont une partie des usagers des services délivrés par les fonctions essentielles ou d'association. D'autre part, les personnes (P) du TcAE sont susceptibles d'être impactées par une perturbation majeure d'origine externe. Ces individus sont caractérisés par leur disponibilité, mobilité et intégrité (d'après Robert *et al*, 2008) influençant directement le nombre d'individus actifs susceptibles de se rendre à leur travail.

La disponibilité ou mobilité des utilisateurs sont estimées en fonction du nombre d'utilisateurs théoriques présents dans la zone d'alimentation, la demande et le service d'entrée ainsi qu'un coefficient d'impact qui traduit le nombre d'utilisateurs impactés par la perte de service en utilisateurs indisponibles ou immobiles (Figure 52). Les valeurs de mobilité dépendent des services délivrés par les séquences fonctionnelles associées aux missions de fourniture du service essentiel de mobilité de la population tandis que les valeurs de disponibilité dépendent des services délivrés par les autres séquences fonctionnelles. Par exemple, la disponibilité des utilisateurs s'évalue en fonction du service « Distribution eau potable » alors que la mobilité se calcule par le service « Déplacement des utilisateurs par le mode ferroviaire ». Les coefficients de disponibilité ou mobilité évaluent le ratio du nombre d'utilisateurs disponibles ou mobiles sur le nombre d'utilisateurs théoriques d'une zone d'alimentation.

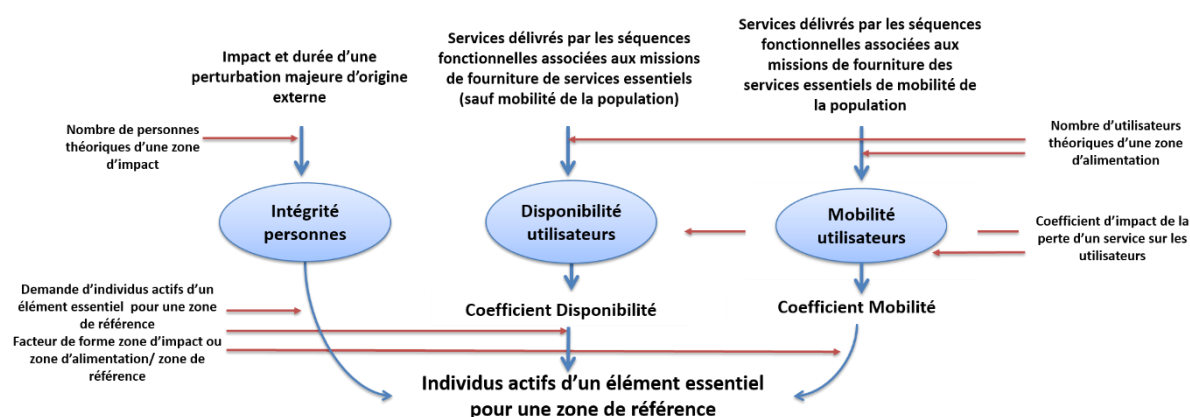


Figure 52 : Intégrité, Disponibilité et Mobilité des individus du TcAE

L'intégrité des personnes est évaluée à partir du nombre de personnes théoriques contenu dans la zone d'impact, de la valeur l'impact et de la durée d'une perturbation majeure d'origine externe issue des catégories catastrophes naturelles/ environnementales/ sanitaires.

Par ailleurs, afin de traduire la disponibilité et la mobilité des utilisateurs ou l'intégrité des personnes en nombre d'individus actifs pouvant se rendre à leur travail, des zones de référence sont mises en place.

En effet, chaque service d'une fonction essentielle ou d'association destiné aux usagers dessert sa propre zone d'alimentation et une perturbation majeure d'origine externe touche des zones d'impacts différentes selon le scénario d'aléa. Il est considéré dans le projet que le nombre d'individus actifs travaillant pour un élément essentiel dans chaque zone de référence est connu et qu'ils se répartissent de manière homogène. L'intérêt des zones de référence est donc d'estimer à partir du nombre d'utilisateurs indisponibles ou immobiles d'une zone d'alimentation ou des personnes touchées dans une zone d'impact, le nombre d'individus actifs d'un élément essentiel pour une zone de référence ne pouvant se rendre

à son travail. Pour cela, un facteur de forme entre une zone d'alimentation ou une zone d'impact et une zone de référence est évalué comme la part (en %) de surface de la zone d'alimentation/zone d'impact comprise dans la surface de la zone de référence. Par conséquent, la valeur du facteur de forme est :

- nulle lorsqu'il n'y a aucune surface commune entre les deux zones ;
- 1 lorsque la zone d'alimentation ou zone d'impact est comprise à l'intérieur de la zone de référence ;
- Egale au rapport de la surface commune entre les deux zones (ZA/ZR ou ZI/ZR) sur la surface de la zone de référence.

Par exemple, U1, U2, U3 et U4 sont les utilisateurs alimentés par quatre entrées distinctes « Distribution eau potable », avec ZA1, ZA2, ZA3 et ZA4 les quatre zones d'alimentation associées (limites bleues sur la Figure 53). IA1 et IA2 sont respectivement le nombre d'individus actifs de l'élément essentiel « Centre hospitalier » (point rouge sur Figure 53) des zones de référence ZR1 et ZR2 (limites jaunes sur la Figure 53).

A partir du coefficient de disponibilité de U1 (calculé en fonction de l'entrée reçue par les utilisateurs), la demande d'individus actifs IA1 ou IA2 et le facteur de forme entre ZA1 et ZR1 (=1 dans ce cas) ou ZA1 et ZR2 (=0 dans ce cas), le nombre d'individus actifs IA1 ou IA2 pour l'élément essentiel « Centre hospitalier » est alors évalué (idem pour U2, U3 et U4).

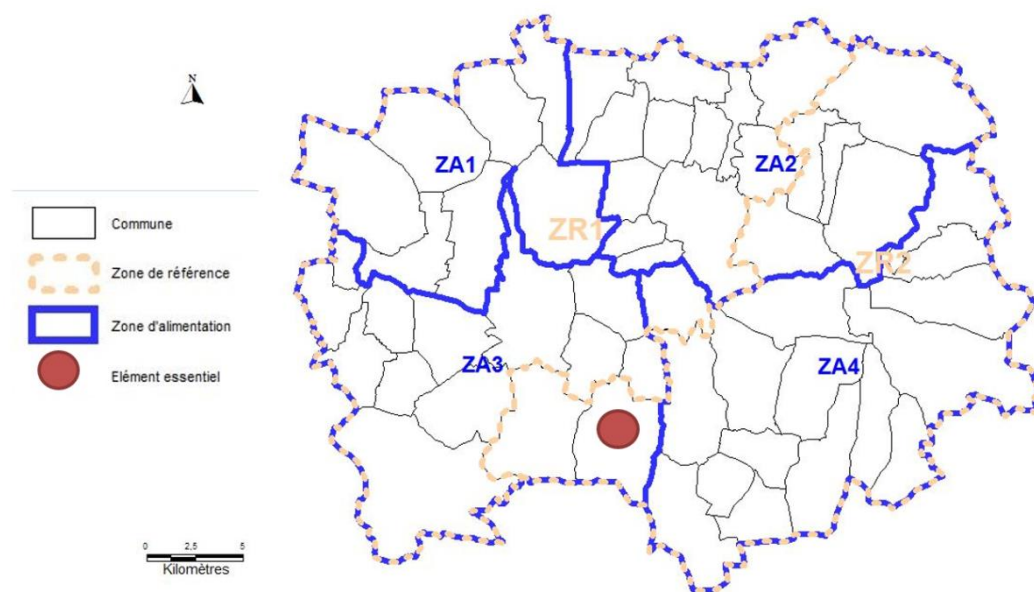


Figure 53 : Carte présentation des zones de référence

II-1.6. Définition de la résilience systémique d'un TcAE

La première partie du manuscrit a argumenté la polysémie des notions de vulnérabilité et résilience. La finalité du projet portant essentiellement sur des propositions de planification des mesures de continuité ou rétablissement d'activités, il semble pertinent de parler de résilience du TcAE (d'après Lhomme, 2012). De plus, les caractéristiques et les paramètres de fonctionnement intrinsèques des éléments essentiels et fonctions essentielles ou d'association portent sur la capacité d'absorption et de remise en service. Par ailleurs, de la même manière que pour son utilisation à la notion de vulnérabilité et plus rarement à la notion de résilience, le facteur systémique est ajouté afin d'accentuer l'importance accordée aux liens d'interactions se produisant à l'intérieur du TcAE.

La notion de résilience systémique du TcAE est alors définie à partir de l'adaptation de la définition du (SGDSN, 2014) comme :

« La capacité d'un Territoire composé d'Activité Essentielles à résister aux impacts directs et indirects d'une perturbation majeure, puis à rétablir sa capacité de fonctionnement normal, ou à tout le moins dans un mode socialement acceptable ».

L'intérêt final de cette démarche méthodologique réside dans l'évaluation de la résilience systémique du TcAE à partir de l'étude du comportement du TcAE touché par une perturbation majeure (Figure 54).

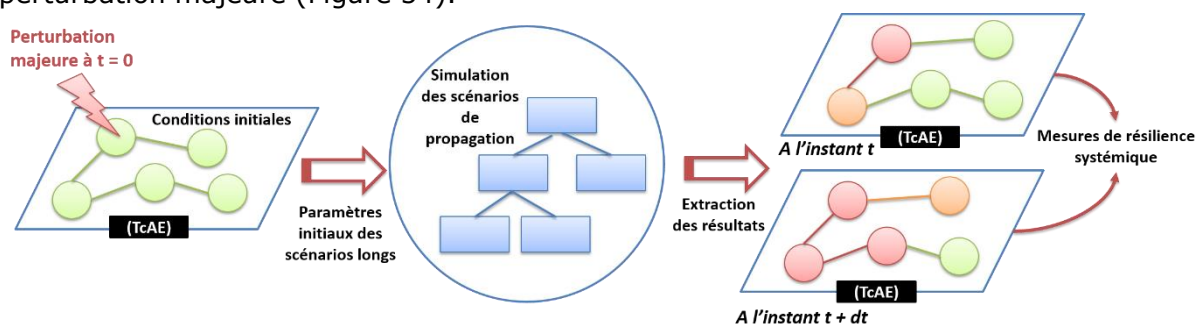


Figure 54 : Evaluation de la résilience systémique

Cela conduit à préciser les termes de « fonctionnement normal » ou « mode socialement acceptable » d'un TcAE présents dans la définition donnée de la résilience systémique en établissant des seuils d'acceptabilité des différentes pertes de service subies par les éléments essentiels et individus touchés. La mise en place des seuils via la détermination de valeurs est une étape primordiale mais difficile à opérationnaliser. En effet, l'accord entre les différents acteurs (opérateurs et gouvernance) sur cette estimation quantitative est compliqué à trouver. Néanmoins, cette solution d'établir des seuils nous paraît être la seule option pour évaluer la résilience systémique d'un TcAE et ainsi comparer différents résultats de scénarios de propagation. La détermination des valeurs des seuils est laissée aux utilisateurs de la méthodologie à partir de la description des paramètres influents ces estimations. Trois paramètres sont retenus afin d'estimer l'acceptabilité de chaque perte de service. Il s'agit :

- Du pourcentage de perte de service évalué en fonction du service et de la demande des éléments essentiels et individus du TcAE;
- De la durée de la perte de service subie par les éléments essentiels et individus ;
- Du moment d'apparition (=cinétique) de la perte de service subie par les éléments essentiels et individus suite à la perturbation majeure.

La mise en place de seuils ne permet donc d'estimer qualitativement ou quantitativement la résilience du TcAE mais uniquement de connaître les conséquences acceptables ou non des différentes pertes de service selon une perturbation majeure. Des mesures de résilience systémique d'un TcAE peuvent alors être proposées en cas de conséquences inacceptables et ainsi mettre en place une stratégie à l'échelle du territoire.

II-1.7. Synthèse

Ce chapitre a permis de justifier la démarche méthodologique envisagée. Les aspects multi-échelles du territoire, intersectoriels et multifonctionnels des IC permettant de répondre aux attentes du projet ont conduit à développer une nouvelle démarche. Celle-ci s'appuie sur les concepts de territoire, d'infrastructures critiques et de résilience ainsi que sur l'approche systémique.

Le concept de Territoire composé d'Activités Essentielles (TcAE) est un apport essentiel de cette démarche multi-échelles. L'organisation du TcAE et ses finalités sont décrites au travers des descriptions organiques et fonctionnelles. L'approche spatiale contribue à enrichir les possibilités méthodologiques et illustre sa complémentarité avec l'approche systémique. Par ailleurs, le TcAE est étudié comme un système ouvert recevant et émettant des ressources. Afin d'étudier ces échanges de ressources à l'intérieur du TcAE, deux nouveaux formalismes sont développés associant à la fois les éléments essentiels et les fonctions essentielles ou d'association qu'ils réalisent mais aussi les individus.

D'autre part, le TcAE est soumis à des perturbations majeures d'origine interne ou externe. Ces dernières se propagent grâce à la formalisation des liens d'interdépendances entre les ressources et fonctions essentielles ou d'association du TcAE. Les liens physiques, cybernétiques, géographiques, individus et entre les éléments essentiels et les fonctions essentielles ou d'association qu'ils réalisent sont pris en compte.

L'intérêt de suivre la propagation d'une perturbation majeure dans le temps et de manière quantitative amène ensuite à présenter les paramètres de demande des entrées et sorties des séquences fonctionnelles et les paramètres intrinsèques et caractéristiques de fonctionnement des éléments essentiels, fonctions essentielles ou d'association et individus. La demande amont ou aval des usagers est répartie entre les différentes fonctions essentielles ou d'association de la séquence fonctionnelle et des données d'entrée des capacités d'absorption et de remise en service sont intégrés aux ressources du TcAE. Par ailleurs, les individus sont caractérisés par leur intégrité, disponibilité ou mobilité. Afin d'obtenir le nombre d'individus actifs d'un élément essentiel, le concept de zone de référence est introduit permettant de convertir le nombre d'utilisateurs d'une zone d'alimentation ou de personne d'une zone d'impact subissant en nombre d'individus actifs d'un élément essentiel pour une zone de référence ne pouvant se rendre à son travail.

Enfin, la résilience systémique d'un TcAE est définie. Cette notion permet de structurer l'évaluation des résultats des scénarios de propagation en proposant des mesures de résilience visant à réduire les impacts directs et indirects d'une perturbation majeure.

II-2. Développement de la démarche méthodologique d'analyse des interdépendances d'un TcAE suite à une perturbation majeure

Ce chapitre a pour but de développer la démarche méthodologique articulée en trois étapes : le modèle du TcAE dans un environnement à risque, l'élaboration des scénarios de propagation et l'évaluation de la résilience systémique.

II-2.1. Préambule

Structurée en trois étapes, cette nouvelle méthodologie répond au besoin d'identifier les impacts directs et indirects induits par une perturbation majeure en suivant l'évolution temporelle et spatiale des éléments constituant le TcAE (Figure 55). Les échelles d'application de cette méthodologie sont au nombre de quatre : communale, départementale, zonale et nationale.

La première étape consiste à déterminer l'ensemble des fonctions essentielles ou d'association et les ressources du TcAE afin d'obtenir le modèle du TcAE. L'identification des perturbations externes subies et des flux de danger émis est également effectuée.

La seconde étape permet le développement des scénarios de propagation du TcAE afin de suivre la perturbation de la perturbation majeure via les liens d'interdépendances. Les différents enchaînements élaborés sont également configurés en tenant compte des paramètres de demande et service, des paramètres intrinsèques et caractéristiques de fonctionnement des éléments essentiels, fonctions essentielles ou d'association et individus.

La dernière étape se consacre à l'évaluation de la résilience systémique du TcAE à partir de la simulation des scénarios de propagation. Cette simulation à intervalle discret est réalisée en faisant l'hypothèse d'un transfert linéaire de flux à chaque pas de temps. La perte d'activité des éléments essentiels, l'état des stocks de sortie des fonctions essentielles ou d'association et le nombre d'individus du TcAE impactés sont évalués.

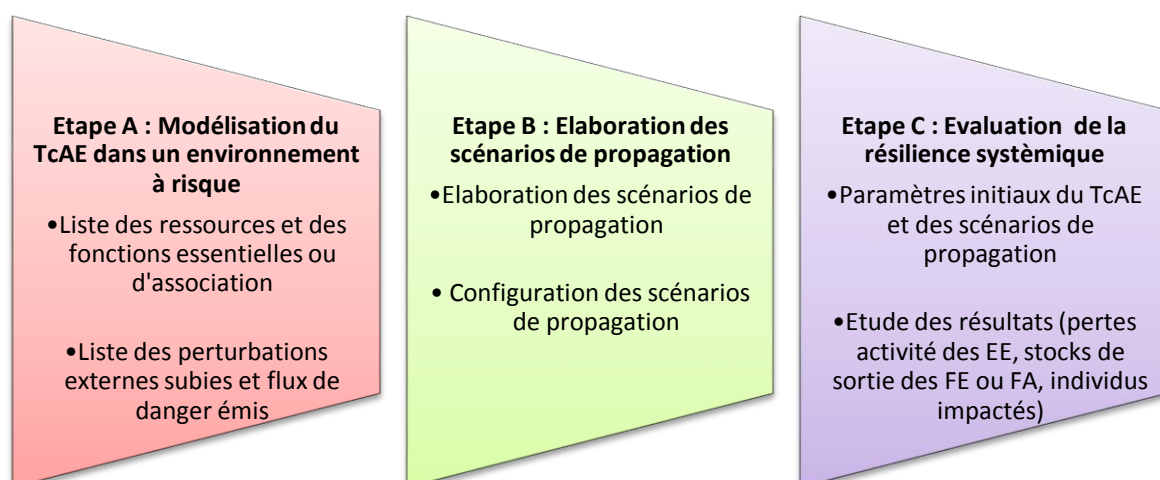


Figure 55 : Etapes détaillées de la démarche méthodologique

Par ailleurs, conduire une telle démarche amène à rassembler de nombreuses informations qui sont le plus souvent peu accessibles. Dans le cadre du projet, il est considéré que l'utilisateur souhaitant mettre en place cette démarche dispose de ces renseignements. Ainsi, les informations suivantes sont nécessaires :

- L'échelle du TcAE d'étude (locale, départementale, zonale et nationale) ;
- Une présentation détaillée des activités essentielles, la population et les événements externes susceptibles de se produire afin de construire le modèle du TcAE dans un environnement à risque ;
- La localisation des éléments essentiels identifiés et les valeurs invariantes des paramètres intrinsèques de fonctionnement des ressources et fonctions essentielles ou d'association du TcAE qui seront utilisées lors de la configuration des scénarios de propagation. Les zones d'alimentation, d'impact et de référence sont également supposées connues ;
- Les conditions initiales du TcAE avant la propagation d'une perturbation majeure.

II-2.2. Modélisation du TcAE dans un environnement à risque, Etape A

La construction du modèle du TcAE dans un environnement à risque met l'accent sur les ressources échangées par les éléments essentiels, les fonctions essentielles ou d'association et les individus ainsi que les perturbations subies et émises.

II-2.2.1 Construction du modèle TcAE

Le modèle TcAE est élaboré en intégrant l'aspect cognitif (par la représentation des composants des chaînes essentielles et de la population), les aspects prévisionnel et décisionnel (via la simulation qui conduit à fournir une aide à la décision). Enfin, l'approche normative intervient par la prise en compte des règles de priorités et de ressources alternatives.

La construction du modèle requiert quatre phases (Figure 56). La première consiste à établir les chaînes essentielles (CE). La seconde et troisième sont respectivement relatives à la constitution des séquences fonctionnelles et de la population. La dernière phase assemble les informations à l'aide des formalismes élément(s) essentiel(s)/fonction essentielle ou d'association et utilisateurs.



Figure 56 : Phases de construction du modèle TcAE

i. Constitution des chaînes essentielles

Le recensement des éléments essentiels (EE) est réalisé au moyen du couplage entre la typologie des éléments nœuds ou arcs (tels que « gazoduc », « station de captage », « canalisation de distribution d'eau potable ») et les données cartographiques relatives au territoire d'étude. Ce recensement entraîne la formation des éléments essentiels qui regroupent un ou plusieurs éléments du TcAE. Par exemple, un élément nœud « station de captage » devient un élément essentiel alors que des éléments « canalisation de distribution d'eau potable » et « nœuds de connexion des canalisations de distribution d'eau potable » forment un unique élément essentiel « regroupement des canalisations et nœuds de connexion de distribution d'eau potable ».

D'autre part, plusieurs chaînes essentielles de même type peuvent être identifiées. En effet, les missions des chaînes essentielles fournissant des services essentiels à étendue spatiale variable, le TcAE peut comporter plusieurs chaînes essentielles de même type. Par exemple, un TcAE à l'échelle départementale comporte plusieurs chaînes essentielles des réseaux d'eau potable.

Par ailleurs, les supports utilisés par les différents éléments essentiels sont ensuite déterminés au moyen de la typologie correspondante. Ces supports sont caractérisés comme des causes communes de défaillances potentielles. Il s'agit par exemple des ressources de « distribution d'électricité » ou des « individus actifs ».

ii. Constitution des séquences fonctionnelles

La première phase conduit ensuite à identifier les fonctions réalisées par les éléments

essentiels à partir de la typologie existante. La détermination des entrées, contraintes et sorties amène à distinguer les fonctions essentielles ou d'association.

En effet, les éléments essentiels ont la particularité de pouvoir accomplir une ou plusieurs fonctions. Il s'agit de « traiter eau du milieu naturel » pour une station de production d'eau potable ou encore « Stocker des essences » et « Stocker du gazole » pour un dépôt pétrolier. L'identification de ces opérations entraîne la détermination des fonctions essentielle ou d'association suivant d'une part la provenance des entrées et des contraintes utilisées et d'autre part la destination des sorties délivrées. Les ressources entrées, contraintes et sorties sont également listées.

Au final, la liste des fonctions essentielle ou d'association identifiées pour les différents composants des chaînes essentielles permet la représentation des séquences fonctionnelles. Les zones d'alimentation (ZA) associées sont alors spécifiées. Un exemple de séquence fonctionnelle associée à la mission de fourniture du service essentiel d'approvisionnement en eau potable est présentée (Figure 57). Celle-ci comporte trois fonctions essentielles « capter eau du milieu naturel », trois fonctions essentielles « traiter eau du milieu naturel » et les fonctions d'association de « transporter eau potable », « stocker eau potable » et « distribuer eau potable ». La sortie « distribution eau potable » de la dernière fonction essentielle ou d'association de la séquence fonctionnelle peut desservir plusieurs usagers.

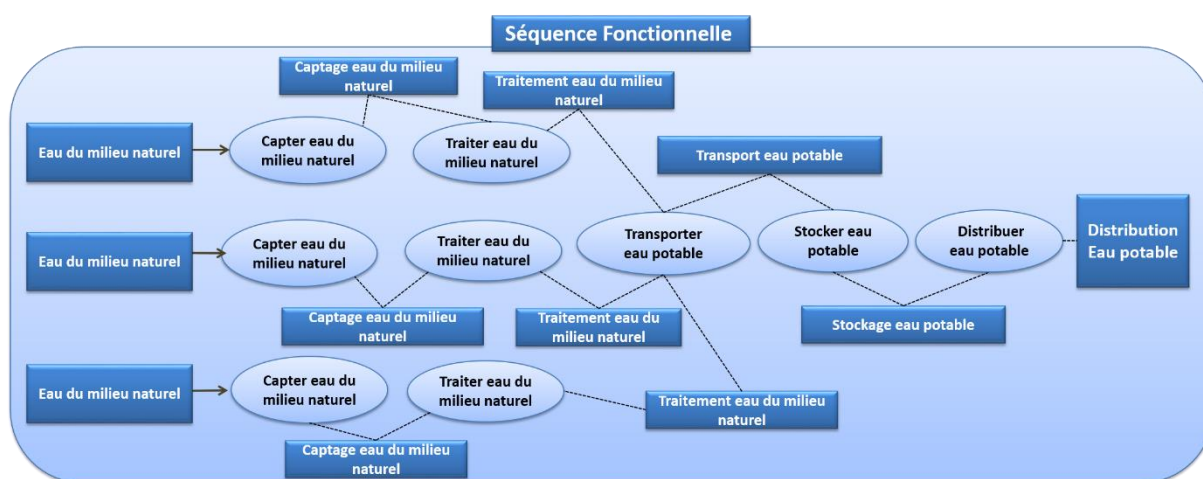


Figure 57 : Exemple de séquence fonctionnelle des composants d'une chaîne essentielle de fourniture d'eau potable

iii. Constitution de la population

Les individus actifs de la population à l'intérieur des zones de référence sont à identifier. En effet, pour chaque zone de référence, il faut évaluer la possibilité qu'elles contiennent ou non des individus actifs d'un élément essentiel. Ces derniers sont des sorties du formalisme Utilisateurs (Figure 60).

iv. Liste des ressources externes

L'utilisation d'une même ressource de l'environnement du TcAE par plusieurs éléments essentiels, fonctions essentielles ou d'association ou utilisateurs et le fait que des ressources délivrées à l'extérieur du TcAE peuvent être identiques, conduisent à établir une liste de ressources externes. Ces ressources entrantes et sortantes sont considérés comme uniques. Il y a un seul fournisseur de la même entrée et un seul destinataire d'une

même sortie de l'environnement du TcAE.

Cette liste servira à l'élaboration des scénarios de propagation afin de constater l'influence et la dépendance des ressources externes entrantes et sortantes du TcAE.

v. Synthèse des informations via les formalismes Élément(s) essentiel(s)/fonction essentielle ou d'association et utilisateurs

Les informations identifiées lors des deux précédentes phases se résument à l'aide du formalisme Élément(s) Essentiel(s)/ Fonction Essentielle ou d'Association (FE ou FA) ou Utilisateurs (U).

L'illustration du formalisme pour le couple élément essentiel/ fonction essentielle est présentée Figure 58 (formalisme couple éléments essentiels/fonction d'association identique sauf concernant l'utilisation des supports distincts). Cette figure illustre la provenance des entrées, contraintes et supports ainsi que le devenir des sorties.

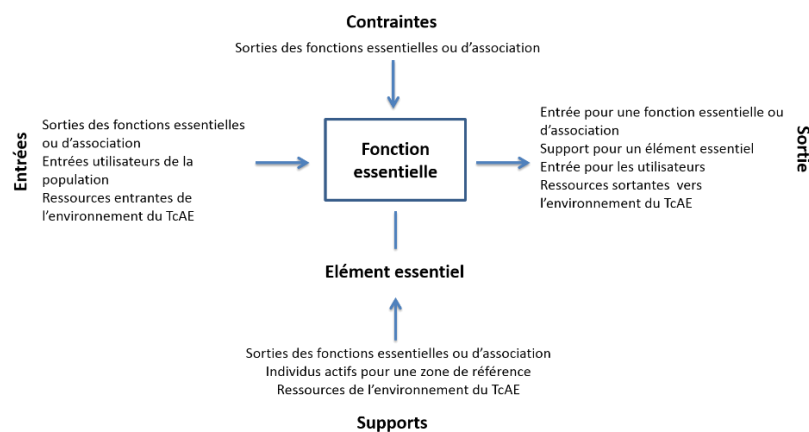


Figure 58 : Formalisme du couple élément essentiel/fonction essentielle

Un exemple de couple élément essentiel/fonction essentielle est présenté Figure 59. Il s'agit de l'élément essentiel « station de production d'eau potable » qui réalise la fonction essentielle « Traiter eau du milieu naturel ». Cette dernière utilise en entrée le « captage eau du milieu naturel », la contrainte « transmission informations centre de pilotage réseau eau potable » et délivre en sortie « traitement eau du milieu naturel ». L'élément essentiel utilise le support « distribution électricité ».

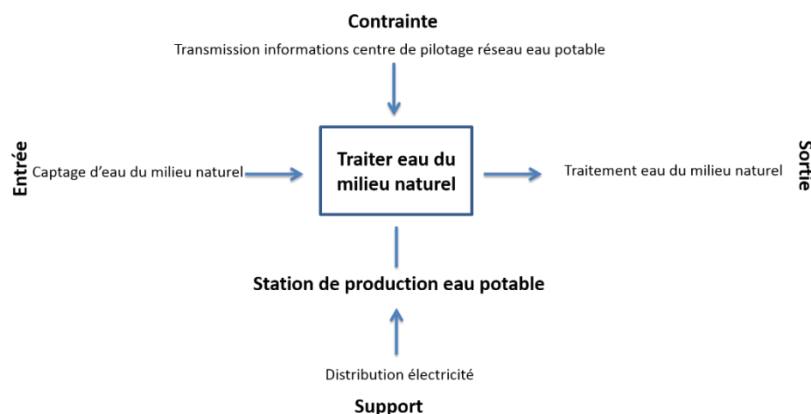


Figure 59 : exemple formalisme EE/FE

Les entrées et sorties des utilisateurs sont également formalisées (Figure 60). Par exemple, un utilisateur a besoin de l'entrée « Distribution eau potable » et délivre les sorties « Individus Actifs Etablissement de santé zone de référence » ou « Individus Actifs Mairie zone de référence » (Figure 60).

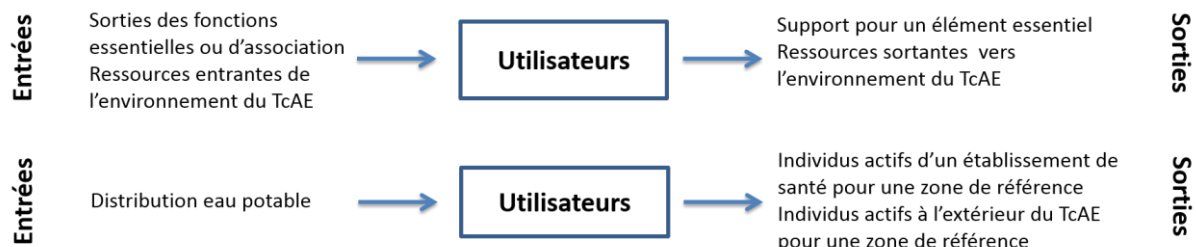


Figure 60 : Formalisme utilisateur et exemple

II-2.2.2 Identification des perturbations

Les listes des ressources du modèle TcAE mettent en avant plusieurs perturbations d'origine interne pouvant survenir (perte ou affluence d'une entrée, perte de support,...). Par ailleurs, les perturbations externes sur les éléments essentiels (EEk) et les personnes sont à déterminer ainsi que les flux de danger potentiels émis par les éléments essentiels à partir de la typologie des perturbations externes.

Ces informations peuvent être réunies sous forme d'un tableau (voir Tableau 9).

		EEi	EEj	...	EE _n	Pi	Pj	...	P _n
Perturbations externes	Tempête		X						
	Inondation	X				X			
								
Perturbations internes émises	Effet missile		X			Non - concernées			
	Effet surpression	X							

Tableau 9 : Identification des perturbations externes et des perturbations émises

Pour terminer l'identification des perturbations, trois informations sont à intégrer concernant :

- la localisation des éléments essentiels du TcAE permettant de construire une matrice des distances. Cette information porte uniquement sur les éléments essentiels composés d'éléments dits « nœuds » ;
- la valeur du rayon de danger d'un flux de danger k émis par un élément essentiel EE_k, noté RayonDanger(k, EE_k) ;
- les différentes zones d'impacts ZI_c des perturbations externes sur les personnes.

La détermination de ces deux derniers paramètres peut s'appuyer sur les informations contenues dans les études de danger et les plans de prévention des risques naturels et industriels.

II-2.3. Elaboration des scénarios de propagation, Etape B

La seconde étape méthodologique consiste à élaborer et configurer des scénarios afin de suivre les effets d'une propagation d'une perturbation majeure dans le temps et l'espace à partir des liens d'interdépendances du TcAE.

II-2.3.1 Construction des scénarios de propagation

Des scénarios dits courts puis des scénarios dits longs (=scénarios de propagation) sont élaborés afin de mettre en avant les effets de la propagation d'une perturbation majeure à travers les liens d'interdépendances. Une matrice des liens formalise ces enchaînements. L'ensemble des informations nécessaires à la construction de ces scénarios de propagation sont issues de l'étape A.

i. Cas des scénarios courts

La liste des scénarios courts est élaborée à partir de l'étude des causes et effets des défauts des éléments essentiels, des défaillances des fonctions essentielles ou d'association et de l'affaiblissement des individus. Six types de causes et trois types d'effets sont distingués (Figure 61). Les causes liées à une perturbation externe, une perte d'un support ou d'une contrainte, une perte ou affluence d'une entrée sont des perturbations majeures ou initiales.

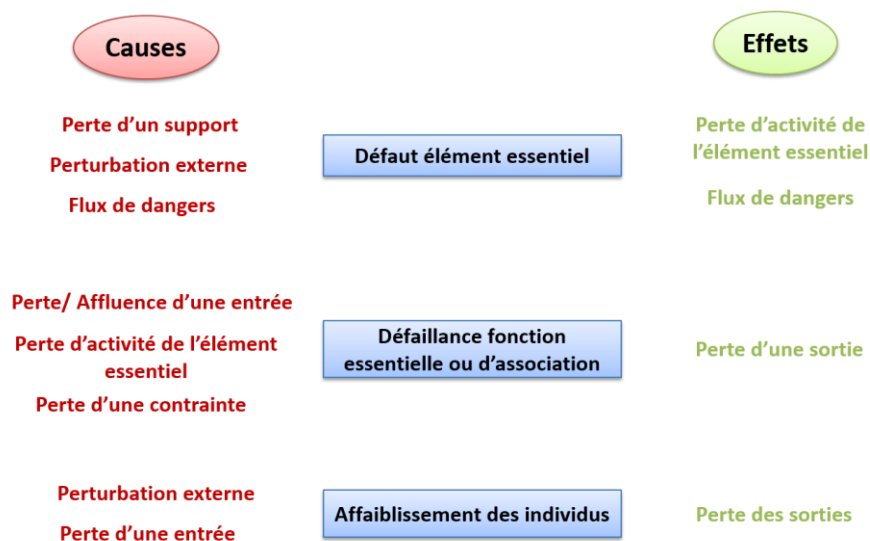


Figure 61 : Typologie causes et effets des défauts des EE, défaillances des FE ou FA et faiblesses des individus

Ainsi, les causes impactent :

- les éléments essentiels en provoquant un défaut lié à une perte d'intégrité de l'élément essentiel lorsqu'il s'agit d'une perturbation externe ou d'un flux de dangers. Un défaut est lié à une perte d'opérabilité de l'élément essentiel dans le cas d'une perte de support.

Deux effets possibles sont mis en évidence : une perte d'activité de l'élément essentiel et un flux de danger dans le cas où l'élément essentiel est susceptible

- d'être source de danger ;
- les fonctions essentielles ou d'association en provoquant une défaillance liée à une perte d'opérabilité dans le cas d'une perte ou affluence d'une d'entrée, une non-réalisation lors d'une perte de contrainte mais aussi un non-accomplissement suite à la perte d'activité de l'élément essentiel. Un seul effet se manifeste : il s'agit de la perte de sortie de la fonction ;
- les individus en provoquant un affaiblissement lié à la diminution de la disponibilité ou mobilité des utilisateurs ou une perte d'intégrité des personnes. Cela induit des pertes de sorties qui correspondent à la diminution du nombre d'individus actifs d'une zone de référence donnée pour le fonctionnement des éléments essentiels.

A partir des types de causes et d'effets possibles, sept enchaînements ou parcours de scénarios courts possibles sont mis en évidence :

- Parcours 1, illustre une perturbation externe (catégories catastrophes naturelles /environnementales/ sanitaires ; accidents industriels ; menaces intentionnelles) ou un flux de dangers qui influence l'intégrité de l'élément essentiel puis sa perte d'activité et un flux de danger potentiel ;
- Parcours 2, illustre un support de l'élément essentiel influant sur son opérabilité et sa perte d'activité ;
- Parcours 3, illustre une contrainte influant sur la réalisation d'une fonction essentielle ou d'association et le service de sortie ;
- Parcours 4, illustre l'impact de la perte d'activité de l'élément essentiel sur l'accomplissement de la fonction essentielle ou d'association qu'il réalise et le service de sortie ;
- Parcours 5, illustre une entrée influant sur l'opérabilité d'une fonction essentielle ou d'association et le service de sortie ;
- Parcours 6, illustre une perturbation externe (catégories catastrophes naturelles /environnementales/ sanitaires ; accidents industriels ; menaces intentionnelles) qui influence l'intégrité des personnes dans une ZI et la sortie d'individus actifs des éléments essentiels des zones de référence ;
- Parcours 7, illustre une entrée influant sur la disponibilité ou mobilité des utilisateurs et la sortie d'individus actifs des éléments essentiels des zones de référence ;

Au final, l'application de ces parcours aux différentes informations obtenues lors de l'étape A génère une liste de scénarios courts. Par exemple, il a été identifié qu'une inondation était susceptible d'impacter un élément essentiel « station de captage ». Le triptyque correspondant est : Inondation/ Intégrité « station de captage »/ Perte activité « station de captage » (scénario court issu du parcours 1).

ii. Des scénarios courts aux scénarios longs

Du fait des liens entre les éléments essentiels, fonction essentielle ou d'association et les individus, les scénarios courts (SCi) listés peuvent s'enchaîner. Par ailleurs, les ressources entrantes (REi) et sortantes (RSi) de l'environnement de même type sont considérées comme uniques. Or, ces ressources sont distinguées par les différentes entrées, supports, contraintes utilisés ou sorties délivrées dans les scénarios courts.

Ces ressources externes et les scénarios courts formés permettent d'élaborer des scénarios de propagation formalisés à l'aide d'une matrice des liens (Figure 62). Cette formalisation est extraite de travaux existants sur l'analyse de risque d'un territoire (Brilhac *et al.*, 2009 ; Dassens, 2008). A partir du choix d'un scénario court ou d'une ressource

entrante unique, la matrice permet la construction de scénarios propagation via les différents types de liens existants.

Le premier type de lien (en rouge, Figure 62) dit fonctionnel, correspond à la liaison entre une sortie d'une fonction essentielle ou d'association et :

- l'entrée ou la contrainte d'une autre fonction essentielle ou d'association ;
- l'entrée des utilisateurs ;
- un support d'un élément essentiel ;
- une ressource unique sortante du TcAE.

Les liens fonctionnels correspondent également à la liaison entre une ressource externe entrante et :

- l'entrée ou contrainte d'une fonction essentielle ou d'association ;
- l'entrée des utilisateurs ;
- un support d'un élément essentiel

Par ailleurs, selon la nature de la ressource, deux cas de répartition existent :

- La ressource est indénombrable. Elle est transmise à l'aval ou non (binaire) ;
- La ressource est dénombrable, en cas d'une quantité inférieure par rapport à la demande, elle est soit :
 - partagée à l'aval en fonction du ratio « demande du destinataire » sur la « demande totale des destinataires » (= règles de partage) ;
 - livrée par hiérarchisation des clients (= règles de priorité).

	REi	SC1	SC2	SC ...	SC ...	SC ...	SCn-1	SCn	RSi	Total scénarios influents
REi		1**	1**							2
SC1				1*						1
SC2					1					1
SC ...						1				1
SC ...						1				1
SC ...							1*			1
SCn-1								1		1
SCn									1	1
RSi										0
Total scénarios influents	0	1	1	1	1	2	1	1	1	10

En vert, les liens géographiques

En orange, les liens individus

En noir, les liens entre éléments essentiels et fonctions

En rouge, les liens fonctionnels en distinguant les trois règles de répartition selon la légende suivante

1 : Si indénombrable

1* : Si dénombrable avec règle de partage

1** : Si dénombrable avec règle de priorité

Figure 62 : Matrice des liens

Le second type de lien appelé individu (en orange, Figure 62), correspond à la liaison entre la sortie du nombre d'individus actifs d'une zone de référence vers les supports d'un élément essentiel ou une ressource unique sortante du TcAE.

Les liens géographiques (en vert, Figure 62) entre les éléments essentiels sont établis à partir de la matrice des distances des éléments essentiels et les rayons de danger émis

par les éléments essentiels. Dans le cas où un élément essentiel est susceptible d'engendrer un flux de danger, le rayon du flux de danger est comparé à la distance entre les deux éléments essentiels. Si le rayon de danger est supérieur à la distance des EE, un lien géographique est identifié.

Un dernier type de lien (en noir, Figure 62) correspond à la liaison entre un élément essentiel et la fonction essentielle ou d'association qu'il réalise.

Au final, la construction de cette matrice renseigne sur le nombre de fois où les scénarios courts et ressources entrantes et sortantes de l'environnement du TcAE sont les plus influents et dépendants. Ces renseignements pourront alors dans la dernière méthodologique influencer le choix d'une perturbation majeure afin de constater les impacts des scénarios courts les plus influents ou dépendants.

II-2.3.2 Configuration des scénarios de propagation

La configuration des scénarios courts introduits les formules littérales qui sont utilisées lors de la simulation des scénarios. Cette configuration se distingue suivant les sept types de parcours mis en évidence. Avant cela, les paramètres de demande et les paramètres invariants des ressources utilisés par les scénarios courts sont eux-aussi à configurer.

i. Détermination des paramètres invariants

Plusieurs paramètres invariants concernant les ressources du TcAE sont à configurer. Ces paramètres utilisés par les différents scénarios courts sont :

- La capacité maximale de sortie S_i des fonctions essentielles ou d'association afin d'indiquer sa condition maximale d'opération ou d'action notée :
 $C_{max}(S_i)$, en unité de sortie S_i ;
- La capacité maximale d'un élément essentiel EE_k notée :
 $C_{max}(EE_k)$, en unité de sortie de la fonction essentielle ou d'association réalisée par EE_k .
 Dans le cas où celui-ci réalise une fonction essentielle, la capacité maximale de fourniture d'un élément essentiel est égale à la capacité maximale de fourniture de sortie de sa fonction essentielle ;
- Le temps de remise en service maximal d'un élément essentiel EE_k noté :
 $RemiseMax(EE_k)$, en heures ;
 Le seuil d'intégrité de l'élément essentiel EE_k qui déclenche un flux de danger pouvant impacter un autre élément essentiel noté :
 $SeuilIntegrite(EE_k)$, valeur comprise entre 0 et 1 ;
- Le nombre d'individus théoriques I_d d'une zone de référence :
 $NbreIndividusTheoriques(I_d)$, en nombre d'individus
- Le nombre d'utilisateurs théoriques U_p dépendant d'une zone d'alimentation :
 $NbreUtilisateursTheoriques(U_p)$, en nombre d'individus
- Le facteur de forme entre une zone d'alimentation Z_{Ap} ou une zone d'impact Z_{Ic} et une zone de référence Z_{Rr} noté :
 $Forme(Z_{Ap} \text{ ou } Z_{Ic}, Z_{Rr})$, valeur comprise entre 0 et 1
- Le coefficient d'impact traduisant un nombre d'utilisateurs U_p impacté par une perte d'entrée E_j en utilisateurs indisponibles ou immobiles, noté :
 $CoeffImpact(E_j, U_p)$, valeur comprise entre 0 et 1

ii. Paramètres de demande

L'identification des séquences fonctionnelles et des usagers des services lors de l'étape méthodologique A permet de mettre en place les demandes en ressources. Il s'agit des

paramètres de :

- Demande des utilisateurs Up en entrée Ej notée :
DemandeEj(Ej, Up, t)
- Demande en entrée Ej d'une fonction essentielle ou d'association FE ou FA notée :
DemandeEj(Ej, FEu ou FAu, t)
- Demande en contrainte d'une fonction essentielle ou d'association FEu ou FAu notée :
DemandeCm(Cm, FEu ou FAu, t)
- Demande en support Supl d'un élément essentiel EEk notée :
DemandeSupl(Supl, EEk, t)
- Demande de sortie Si d'individus actifs d'un élément essentiel EEk pour une zone de référence ZRr notée :
DemandeSi(Si, t)
- Demande de sortie Si d'une fonction essentielle ou d'association FE ou FA notée :
DemandeSi(Si, FA ou FE, t)
- Demande de sortie Si de l'environnement du TcAE notée :
DemandeSi(Si, EnvironnementTcAE, t)

Pour chaque séquence fonctionnelle identifiée lors de l'étape A, les expressions littérales des demandes d'entrée et sortie des fonctions essentielles ou d'association ainsi que les demandes d'entrée unique de l'environnement du TcAE sont à mettre en place en fonction de la demande des usagers, des coefficients de demande CoefDemande(Bi, SFj) tenant compte des différentes branches Bi d'une séquence fonctionnelle SFj et des coefficients de conversion CoefConversion(Ej ou Si, FE ou FA ou EnvironnementTcAE) qui traduisent la demande des usagers en demande d'entrée Ej ou Si.

iii. Paramètres des scénarios courts avec les éléments essentiels

Des paramètres communs ou spécifiques aux deux parcours concernant les éléments essentiels sont identifiés. La valeur de disponibilité Dispo(EEk, t) est une donnée d'entrée (en %) commune. Elle indique la possibilité à l'élément essentiel d'être en mode de fonctionnement « maintenance préventive ». Les valeurs d'entrée sont indiquées en rouge sur la Figure 63.

Dans le cas du parcours 1 (Figure 63), **l'impact** (valeur comprise entre 0 et 1) $IMPh(h, EEk)$ de la perturbation externe h sur l'élément essentiel EEk est le paramètre d'entrée du scénario court.

Un pourcentage **d'intégrité** $Ip(h, EEk, t)$ de l'élément essentiel EEk est alors évalué en fonction de l'impact $IMPh(h, EEk)$ de la perturbation externe h et du temps de remise en service $TRemise(h, EEk)$ par l'expression :

$$Ip(h, EEk, t) = 100 - IMPh(h, EEk) * 100 \text{ si } t < TRemise(h, EEk) \text{ sinon } 100\%$$

La durée de remise en service de l'élément essentiel EEk est calculée en fonction du temps de remise en service maximal $TRemiseMax(h, EEk)$ et l'impact $IMPh(h, EEk)$ de la perturbation externe h suivant l'expression :

$$TRemise(h, EEk) = TRemiseMax(h, EEk) * IMPh(h, EEk)$$

Dans le cas du parcours 2 (Figure 63), les paramètres d'entrée du scénario sont ceux de **support** $ServiceSupl(Supl, t)$ et d'autonomie de fonctionnement des ressources alternatives du support Supl possible à l'instant initial $TSupl(Supl, EEk, t = Tinitial)$.

Le pourcentage **d'opérabilité** $Op(Supl, EEk, t)$ de l'élément essentiel EEk est alors obtenu en fonction de l'inaptitude $ESupl(Supl, EEk, t)$ et de la valeur d'autonomie de fonctionnement du

support $TSupl(Supl, EEk, t)$ par l'expression :

$$Op(Supl, EEk, t) = 100 - ESupl(Supl, EEk, t) \text{ si } TSupl(supl, EEk, t) \leq 0 \text{ sinon } 100 \%$$

L'inaptitude est estimée à partir du service $ServiceSupl(Supl, EEk, t)$ du support et sa demande $DemandeSupl(Supl, EEk, t)$ suivant la formule :

$$ESupl(Supl, EEk, t) = \frac{DemandeSupl(Supl, EEk, t) - ServiceSupl(Supl, EEk, t)}{DemandeSupl(Supl, EEk, t)} * 100$$

La valeur d'autonomie de fonctionnement $TSupl(Supl, EEk, t + dt)$ est mise à jour à chaque pas de temps suivant le résultat de l'inaptitude de support $ESupl(Supl, EEk, t)$ selon l'expression :

$$TSupl(Supl, EEk, t + dt) = TSupl(Supl, EEk, t) - ESupl(Supl, EEk, t) * dt$$

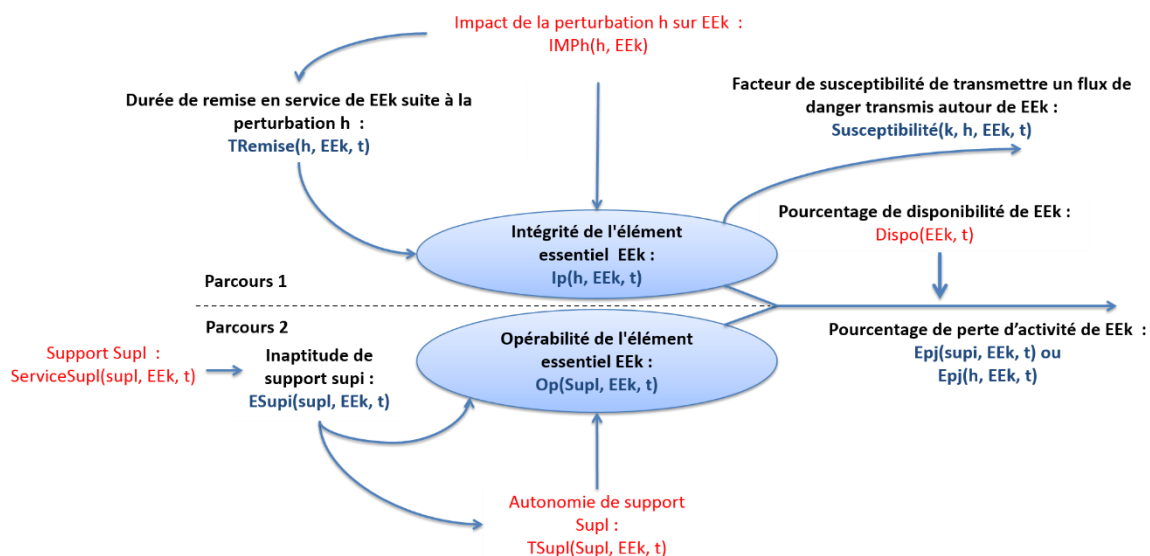


Figure 63 : Configuration des scénarios courts comportant des éléments essentiels

Les valeurs d'opérabilité $Op(Supl, EEk, t)$ ou d'intégrité $Ip(h, EEk, t)$ de l'élément essentiel EEk et sa valeur de disponibilité $Dispo(EEk, t)$ permettent de calculer un pourcentage de **perte d'activité** $Epi(supl, EEk, t)$ ou $Epi(h, EEk, t)$ suivant l'expression :

$$Epi(supl, EEk, t) \text{ ou } Epi(h, EEk, t) = \frac{Dispo(EEk, t) - [Op(supl, EEk, t) \text{ ou } Ip(h, EEk, t)]}{Dispo(EEk, t)} * 100$$

La valeur de perte d'activité de l'élément essentiel EEk va alors influencer l'accomplissement de sa fonction essentielle ou d'association (parcours 4, Figure 64).

Par ailleurs, dans le cas du parcours 1 (Figure 63), selon la valeur obtenue de l'intégrité de l'élément essentiel EEk , **un flux de danger** k est susceptible d'être émis sur un autre élément essentiel $Susceptibilite(k, h, EEk, t)$ suivant l'expression :

$$Susceptibilite(h, k, EEk, t = 0) = 1 \text{ si } Ip(h, EEk, t = 0) < SeuilIntegrite(EEk) \text{ sinon } 0$$

Cette valeur est estimée uniquement à $t=0$ afin de suivre la propagation spatiale éventuelle de la perturbation majeure. Il est donc considéré dans la démarche méthodologique que les effets cascades dus aux liens géographiques entre les éléments essentiels se produisent au même moment que la perturbation majeure.

iv. Paramètres des scénarios courts avec les fonctions essentielles ou d'association

Dans le cas du parcours 3 (Figure 64), le paramètre d'entrée est la valeur de **contrainte** ServiceCi(Cm, FEu ou FAu, t).

Le pourcentage de **réalisation** OCf(Ci, FEu ou FAu, t) de la fonction essentielle ou d'association (FEu ou FAu) est alors estimé suivant cette valeur et la demande DemandeCi(Ci, FE ou FA, t) par l'expression :

$$OCf(Ci, FEu \text{ ou } FAu, t) = 100 - 100 * \frac{(DemandeCm(Cm, FEu \text{ ou } FAu, t) - ServiceCm(Cm, FEu \text{ ou } FAu, t))}{DemandeCm(Cm, FEu \text{ ou } FAu, t)}$$

Dans le cas du parcours 4 (Figure 64), les paramètres d'entrée sont la valeur du pourcentage de **perte d'activité** Epj(supl, EEk, t) ou Epj(h, EEk, t) calculée en fin du parcours 1 ou 2 et le coefficient d'impact fonctionnel CoefImpactFonctionnel(EEk) qui indique le poids (en %) de l'élément essentiel EEk dans la réalisation de sa fonction essentielle ou d'association.

Le pourcentage **d'accomplissement** AFonctionnelle (EEk, FEu ou FAu, Supl ou h, t) s'exprime par :

$$AFonctionnelle(EEk, FEu \text{ ou } FAu, Supl \text{ ou } h, t) = (100 - Epj(supl, EEk, t) \text{ ou } Epj(h, EEk, t)) * CoefImpactFonctionnel(EEk, Si)$$

Le coefficient d'impact fonctionnel est estimé suivant le ratio de la capacité maximale de l'élément essentiel EEk sur la capacité maximale de sortie Si de la fonction essentielle ou d'association qu'il réalise via l'expression :

$$CoefImpactFonctionnel(EE, Si) = \frac{Cmax(EE)}{Cmax(Si)}$$

En ce qui concerne le parcours 5 (Figure 64), le paramètre d'entrée du scénario court est la valeur **d'entrée** ServiceEj(Ej, FEu ou FAu, t) de la fonction essentielle ou d'association.

Le pourcentage **d'opérabilité** de la fonction essentielle ou d'association est alors estimé suivant les valeurs d'entrée ServiceEj(Ej, FEu ou FAu, t) et de demande DemandeEj(Ej, FEu ou FAu) par l'expression :

$$Op(Ej, FEu \text{ ou } FAu, t) = 100 - 100 * \frac{(DemandeEj(Ej, FEu \text{ ou } FAu, t) - ServiceEj(Ej, FEu \text{ ou } FAu, t))}{DemandeEj(Ej, FEu \text{ ou } FAu, t)}$$

Il y a une condition sur la valeur d'entrée ServiceEj(Ej, FEu ou FAu, t) dans le cas des séquences fonctionnelles avec une demande amont formulée par l'expression :

$$ServiceEj(Ej, FEu \text{ ou } FAu, t) = DemandeEj(Ej, FEu \text{ ou } FAu, t) \text{ si } DemandeEj(Ej, FEu \text{ ou } FAu, t) < Cmax(Si) \text{ sinon } Cmax(Si) \text{ avec } Si \text{ la sortie de FEu ou Fau utilisant l'entrée } Ej$$

D'autre part, suivant le résultat de la réalisation de la fonction essentielle ou d'association, de l'accomplissement ou de l'opérabilité, une valeur **des stocks** de sortie Si est calculée.

La valeur des stocks et de service de sortie à l'instant initial est un paramètre d'entrée des scénarios courts.

Pour une fonction essentielle ou d'association utilisant une entrée :

Si DemandeSi(Si, FEu ou FAu, t) < CmaxSi(Si) alors

$$\begin{aligned} QStocksSi(Si, Ei, FEu \text{ ou } FAu, t + dt) &= QStocksSi(Si, Ei, FEu \text{ ou } FAu, t) - ServiceSi(Si, Ei, FEu \text{ ou } FAu, t) \\ &+ DemandeSi(Si, FEu \text{ ou } FAu, t + dt) * \frac{[Op(Ej, FEu \text{ ou } FAu, t + dt)]}{100} \end{aligned}$$

Sinon

$$\begin{aligned} QStocksSi(Si, Ei, FEu \text{ ou } FAu, t + dt) &= QStocksSi(Si, Ei, FEu \text{ ou } FAu, t) - ServiceSi(Si, Ei, FEu \text{ ou } FAu, t) \\ &+ CmaxSi(Si) * \frac{[Op(Ej, FEu \text{ ou } FAu, t)]}{100} \end{aligned}$$

Pour une fonction essentielle ou d'association utilisant un élément essentiel ou une contrainte, il convient de remplacer dans les deux formules précédentes respectivement pour une contrainte et un élément essentiel :

$QStocksSi(Si, Ei, FEu \text{ ou } FAu, t + dt)$ par $QStocksSi(Si, Cm, FEu \text{ ou } FAu, t + dt)$ ou $QStocksSi(Si, EEk, Supl \text{ ou } h, FEu \text{ ou } FAu, t + dt)$

Et

$QStocksSi(Si, Ei, FEu \text{ ou } FAu, t)$ par $QStocksSi(Si, Cm, FEu \text{ ou } FAu, t)$ ou $QStocksSi(Si, EEk, Supl \text{ ou } h, FEu \text{ ou } FAu, t)$

Et

$Op(Ej, FEu \text{ ou } FAu, t)$ par $OCf(Cm, FEu \text{ ou } FAu, t)$ ou $AFonctionnelle(EEk, FEu \text{ ou } FAu, Supl \text{ ou } h, t)$

Et

$ServiceSi(Si, Ei, FEu \text{ ou } FAu, t)$ par $ServiceSi(Si, Ci, FEu \text{ ou } FAu, t)$ ou $ServiceSi(Si, EEk, Supl \text{ ou } h, FEu \text{ ou } FAu, t)$

L'expression de la nouvelle valeur de stocks comporte une condition qui permet de vérifier que l'action réalisée par la fonction essentielle ou d'association ne dépasse pas sa capacité maximale de fourniture de service.

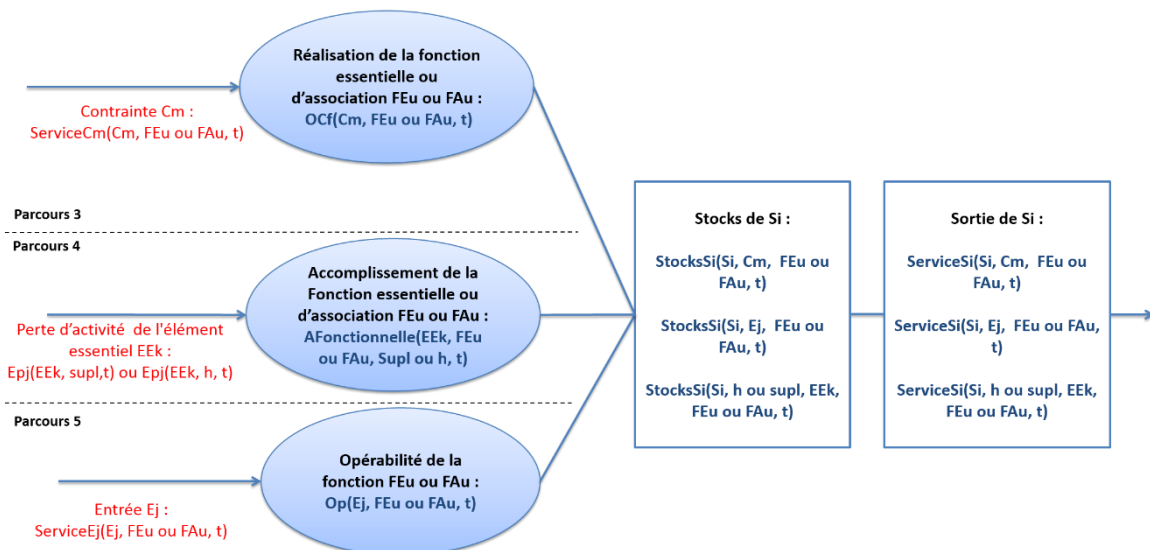


Figure 64 : Configuration des scénarios courts comportant des fonctions essentielles ou d'association

A partir de la valeur des stocks de Si, une valeur **de sortie** est estimée en fonction de la demande $DemandeSi(Si, FEu \text{ ou } FAu, t)$.

Pour une fonction essentielle ou d'association utilisant une entrée :

Si $DemandeSi(Si, FEu \text{ ou } FAu, t) < QStocksSi(Si, Ei, FEu \text{ ou } FAu, t)$ alors
 $ServiceSi(Si, Ei, FEu \text{ ou } FAu, t) = DemandeSi(Si, FEu \text{ ou } FAu, t)$

Sinon

$ServiceSi(Si, Ei, FEu \text{ ou } FAu, t) = QStocksSi(Si, Ei, FEu \text{ ou } FAu, t)$

Pour une fonction essentielle ou d'association utilisant une contrainte :

Si $DemandeSi(Si, FEu \text{ ou } FAu, t) < QStocksSi(Si, Cm, FEu \text{ ou } FAu, t)$ alors
 $ServiceCm(Si, Cm, FEu \text{ ou } FAu, t) = DemandeSi(Si, FEu \text{ ou } FAu, t)$

Sinon

$ServiceCm(Si, Cm, FEu \text{ ou } FAu, t) = QStocksSi(Si, Cm, FEu \text{ ou } FAu, t)$

Pour une fonction essentielle ou d'association utilisant un élément essentiel :

Si $Epj(supl, EEk, t)$ ou $Epj(h, EEk, t) < 100 \%$ alors

Si $DemandeSi(Si, FEu \text{ ou } FAu, t) < QStocksSi(Si, EEk, Supl \text{ ou } h, FEu \text{ ou } FAu, t)$ alors

$ServiceSi(Si, EEk, Supl \text{ ou } h, FEu \text{ ou } FAu, t) = DemandeSi(Si, FEu \text{ ou } FAu, t)$

Sinon

$ServiceSi(Si, EEk, Supl \text{ ou } h, FEu \text{ ou } FAu, t) = QStocksSi(Si, EEk, Supl \text{ ou } h, FEu \text{ ou } FAu, t)$

Sinon

Si $DemandeSi(Si, FEu \text{ ou } FAu, t) < (1 - CoefImpactFonctionnel(EEk, Si)) * QStocksSi(Si, EEk, Supl \text{ ou } h, FEu \text{ ou } FAu, t)$

$QStocksSi(Si, EEk, Supl \text{ ou } h, FEu \text{ ou } FAu, t)$

alors

$ServiceSi(Si, EEk, Supl \text{ ou } h, FEu \text{ ou } FAu, t) = DemandeSi(Si, FEu \text{ ou } FAu, t)$

Sinon

$ServiceSi(Si, EEk, Supl \text{ ou } h, FEu \text{ ou } FAu, t) = QStocksSi(Si, EEk, Supl \text{ ou } h, FEu \text{ ou } FAu, t)$

Le service de sortie Si délivré suite au lien avec l'élément essentiel est déterminé en fonction de la perte d'activité de l'élément essentiel EEk. En effet, dans le cas où celle-ci est égale à 100 %, il est considéré que les stocks de Si dépendant d'un élément EEk ne sont plus en mesure d'être utilisés. Par exemple, un élément essentiel EEk « Dépôt pétrolier » utilise le support supl « Distribution d'électricité ». Si ce support venait à s'interrompre, les stocks de la fonction essentielle ou d'association ne sont plus utilisables.

v. Individus de la population

Trois parcours ont été identifiés concernant les individus de la population (Figure 65).

Pour le parcours 6, **l'impact** (valeur comprise entre 0 et 1) $IMPh(h, Up)$ de la perturbation externe h sur les personnes Pf et **la durée de perturbation** $TempsPerturbationh(h, Pf)$ sont les paramètres d'entrée du scénario (en rouge sur la Figure 65).

L'intégrité des personnes notée $Integrite(Ej, Pf, t)$ est alors estimée par l'expression :

$$Integrite(h, Pf, t) = NbreIndividusTheoriques(Pf) * (1 - IMPh(h, Pf)) \text{ si } t \geq TempsPerturbationh(h, Pf)$$

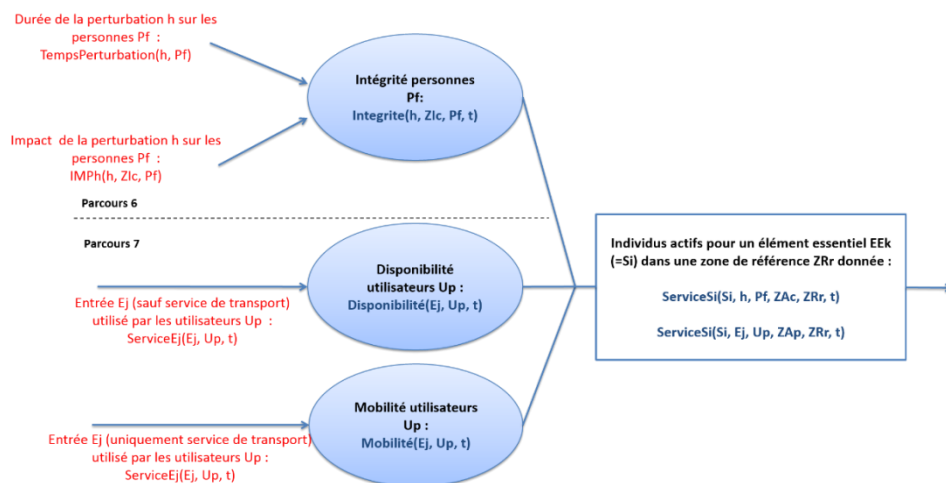


Figure 65 : Scénarios courts comportant les individus

Le nombre **d'individus actifs d'un élément essentiel** communs aux zones d'impact et de référence est alors déterminé par l'expression :

Si $\text{Forme}(\text{Zlc}, \text{ZRR}) = 0$

$$\text{ServiceSi}(\text{Si}, \text{h}, \text{Pf}, \text{ZRR}, \text{Zlb}, \text{t}) = \text{DemandeSi}(\text{Si}, \text{ZRR}, \text{t})$$

Sinon

$$\text{ServiceSi}(\text{Si}, \text{h}, \text{Pf}, \text{ZRR}, \text{Zlb}, \text{t})$$

$$= \text{DemandeSi}(\text{Si}, \text{ZRR}, \text{t}) * \text{Forme}(\text{Zlc}, \text{ZRR})$$

$$* [(1 - \text{IMPh}(\text{h}, \text{Zlc}, \text{Pf})) \text{ si } t < \text{TempsPerturbationh}(\text{h}, \text{Up}) \text{ sinon } 1]$$

D'autre part, **le nombre d'individus actifs et « inactifs » d'une zone de référence** impactés par la perturbation h est évalué via la formule :

Si $\text{Forme}(\text{Zlc}, \text{ZRR}) = 0$

$$\text{IndividusImpactes}(\text{h}, \text{Pf}, \text{ZRR}, \text{Zlc}, \text{t}) = 0$$

Sinon

$$\text{IndividusImpactes}(\text{h}, \text{Pf}, \text{ZRR}, \text{Zlc}, \text{t})$$

$$= \text{IndividusTheoriques}(\text{Zlc}) * \text{Forme}(\text{Zlc}, \text{ZRR})$$

$$* [(1 - \text{IMPh}(\text{h}, \text{Zlc}, \text{Pf})) \text{ si } t < \text{TempsPerturbationh}(\text{h}, \text{Up}) \text{ sinon } 1]$$

Dans le cas des parcours 7 et 8 (Figure 65), les **entrées** $\text{ServiceEj}(\text{Ej}, \text{Up}, \text{t})$ utilisées par les utilisateurs sont les paramètres d'entrée des scénarios courts.

La **disponibilité** $\text{Disponibilite}(\text{Ej}, \text{Up}, \text{t})$ ou **mobilité** $\text{Mobilité}(\text{Ej}, \text{Up}, \text{t})$ des usagers Up sont : évaluées selon la valeur de demande $\text{DemandeEj}(\text{Ej}, \text{Up}, \text{t})$, la valeur entrée $\text{ServiceEj}(\text{Ej}, \text{Up}, \text{t})$ et le nombre d'utilisateurs théoriques Up $\text{NbUtilisateursTheoriques}(\text{Up})$ par les expressions :

$$\text{Disponibilite}(\text{Ej}, \text{Up}, \text{t}) \text{ ou } \text{Mobilité}(\text{Ej}, \text{Up}, \text{t})$$

$$= \text{CoefImpact}(\text{Ej}, \text{Up}) * \text{NbUtilisateursTheoriques}(\text{Up}) * (1$$

$$- \frac{(\text{DemandeEj}(\text{Ej}, \text{Up}, \text{t}) - \text{ServiceEj}(\text{Ej}, \text{Up}, \text{t}))}{\text{DemandeEj}(\text{Ej}, \text{Up}, \text{t})})$$

$$\text{DemandeEj}(\text{Ej}, \text{Up}, \text{t})$$

Les coefficients de disponibilité et mobilité sont alors estimés par les expressions :

$$\text{CoefDisponibilite}(\text{Ej}, \text{Up}, \text{t}) \text{ ou } \text{CoefMobilité}(\text{Ej}, \text{Up}, \text{t})$$

$$= [1 - \text{CoefImpact}(\text{Ej}, \text{Up}) * \frac{(\text{DemandeEj}(\text{Ej}, \text{Up}) - \text{ServiceEj}(\text{Ej}, \text{Up}, \text{t}))}{\text{DemandeEj}(\text{Ej}, \text{Up})}]$$

Le nombre **d'individus actifs d'un élément essentiel** communs aux zones d'alimentation et de référence est alors déterminé par l'expression :

Si $\text{Forme}(\text{ZAp}, \text{ZRR}) = 0$

$$\text{ServiceSi}(\text{Si}, \text{Ej}, \text{Up}, \text{ZRR}, \text{ZAp}, \text{t}) = \text{DemandeSi}(\text{Si}, \text{ZRR}, \text{t})$$

Sinon

$$\text{ServiceSi}(\text{Si}, \text{Ej}, \text{Up}, \text{ZRR}, \text{ZAp}, \text{t}) = \text{Forme}(\text{ZAp}, \text{ZRR}) * \text{DemandeSi}(\text{Si}, \text{ZRR}, \text{t}) *$$

$$(\text{CoefDisponibilite}(\text{Ej}, \text{Up}, \text{t}) \text{ ou } \text{CoefMobilité}(\text{Ej}, \text{Up}, \text{t}))$$

Par ailleurs, **le nombre d'individus actifs et « inactifs »** impactés d'une zone de référence à l'entrée reçue par les utilisateurs des ZAp est évalué via la formule :

Si $\text{Forme}(\text{ZAp}, \text{ZRR}) = 0$

$$\text{IndividusImpactes}(\text{Ej}, \text{Up}, \text{ZRR}, \text{ZAa}, \text{t}) = 0$$

Sinon

$$\text{IndividusImpactes}(\text{Ej}, \text{Up}, \text{ZRR}, \text{ZAa}, \text{t})$$

$$= \text{IndividusTheoriques}(\text{ZAp}) * \left(\frac{(\text{DemandeEj}(\text{Ej}, \text{Up}) - \text{ServiceEj}(\text{Ej}, \text{Up}, \text{t}))}{\text{DemandeEj}(\text{Ej}, \text{Up})} \right)$$

$$* \text{Forme}(\text{ZAp}, \text{ZRR})$$

A partir de cette valeur est du nombre d'individus théoriques de ZRR, le pourcentage

d'individus impactés de la zone de référence est connu.

II-2.3.3 Configuration des liens des scénarios longs

Plusieurs liens ont été identifiés entre les scénarios courts et les ressources externes entrantes et sortantes du territoire. Il convient alors de configurer ces enchaînements afin de pouvoir simuler par la suite des scénarios longs ou de propagation.

Dans le cas des liens géographiques, il est considéré que la valeur d'impact de la propagation d'un flux de danger k est égale à 1 ($IMPh(k, EE_k) = 1$). Ainsi, les impacts causés par la proximité entre les éléments essentiels suite à un flux de danger sont majorés.

En ce qui concerne les liens individus, le nombre d'individus actifs pour un élément essentiel EE_k d'une zone de référence donnée $ServiceSi(Si, Ej$ ou h, Up ou Pf, ZRr, ZAp ou $ZIb, t)$ est égal à la valeur du support de l'élément essentiel EE_k $ServiceSupl(Supl, EE_k, t)$ correspondant.

Pour les liens éléments essentiels avec une fonction essentielle ou d'association, la perte d'activité de l'élément essentiel EE_k notée $Epi(supl, EE_k, t)$ ou $Epi(h, EE_k, t)$ et le coefficient d'impact fonctionnel $CoefImpactFonctionnel(EE, Si)$ sont les paramètres d'entrée du scénario court évaluant l'accomplissement de la fonction essentielle ou d'association.

Dans le cas des liens fonctionnels, des règles de priorité/partage sont mises en place. Les règles de priorités instaurées pour les sorties dénombrables des fonctions essentielle ou d'association et les ressources entrantes uniques de l'environnement du TcAE impliquent un ordre de service. Les règles de partage engendrent une répartition égale de la sortie ou service Si . Ces règles ont toute leur signification en cas d'un manque de ressource par rapport à la demande. La Figure 66 illustre ces règles dans le cas d'une sortie Si délivrant son service à différents usagers.

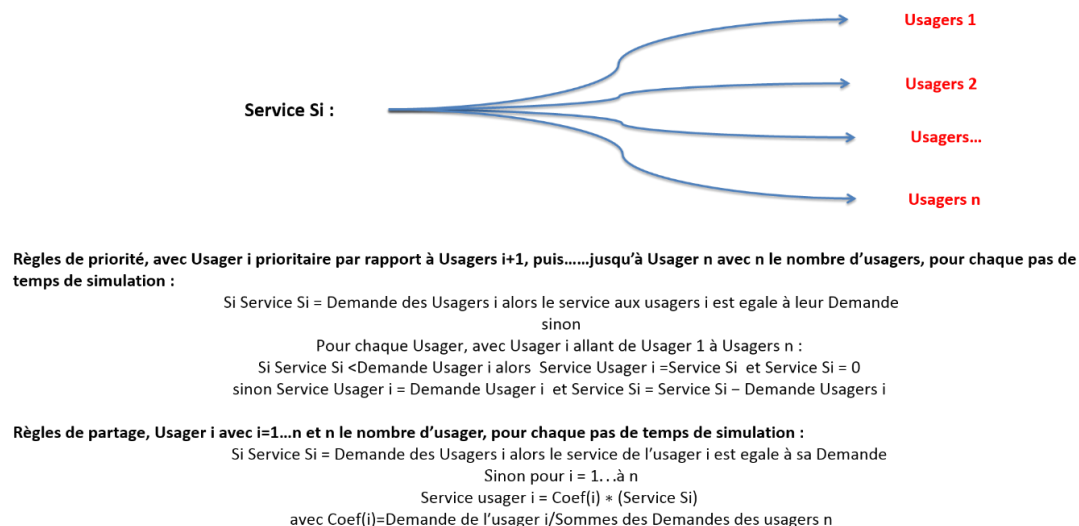


Figure 66 : Règles de priorité/partage de service

Pour les autres, la sortie Si de la fonction essentielle ou d'association FE ou FA est égale à l'entrée Ej ou la contrainte Cm d'une autre fonction essentielle ou d'association FE ou FA, au support $supl$ d'un élément essentiel EE_k , l'entrée Ej des utilisateurs Up , la sortie Si d'une ressource de l'environnement TcAE.

L'expression suivante résume ces propos une sortie fournie suite à l'utilisation d'une entrée :

$$\begin{aligned} \text{ServiceSi}(\text{Si}, \text{Ei}, \text{FEu ou FAu}, t) &= \text{ServiceCi}(\text{Ci}, \text{FEu ou FAu}, t) = \text{ServiceEj}(\text{Ej}, \text{FEu ou FAu}, t) \\ &= \text{ServiceEj}(\text{Ej}, \text{Up}, t) = \text{ServiceSi}(\text{Si}, \text{EnvironnementTcAE}, t) \end{aligned}$$

Pour une sortie Si d'une fonction essentielle ou d'association utilisant un élément essentiel ou une contrainte, il convient de remplacer dans la formule précédente respectivement pour un élément essentiel et une contrainte :

$$\begin{aligned} \text{ServiceSi}(\text{Si}, \text{Ei}, \text{FEu ou FAu}, t) &\text{ par } \text{ServiceSi}(\text{Si}, \text{EEk}, \text{Supl ou h}, \text{FEu ou FAu}, t) \text{ ou} \\ &\text{ServiceSi}(\text{Si}, \text{Cm}, \text{FEu ou FAu}, t) \end{aligned}$$

L'élaboration et la configuration des scénarios de propagation permettent de passer à la dernière étape méthodologique.

II-2.4. Evaluation de la résilience systémique du TcAE, Etape C

Cette partie apporte les réponses à la problématique du projet en utilisant les données des parties précédentes.

A partir du choix d'une perturbation majeure impactant les ressources du TcAE, un ou plusieurs scénarios de propagation sont identifiés à l'aide de la matrice des liens. Ces scénarios comportent des ramifications (= cascades de scénarios courts).

A ce titre, en raison des nombreuses interdépendances à l'intérieur du TcAE, les ramifications (=succession de scénarios courts en cascade) des scénarios longs sont à interrompre. Cela entraîne que tous les usagers des services ne sont pas intégrés dans les scénarios de propagation. Il convient néanmoins de tenir compte de leur demande pour évaluer l'opérabilité des fonctions essentielles ou d'association participant à la réalisation de ce service. Les retours d'expérience cités en préambule à ce travail évoquent principalement des impacts directs et indirects d'ordre 1 et 2 sur les activités essentielles. Il est alors convenu dans le cadre de la méthodologie de stopper les ramifications lorsque trois séquences fonctionnelles distinctes via les fonctions essentielles ou d'association réalisées, apparaissent dans une même ramification. L'accomplissement de trois missions des chaînes essentielles est donc étudié.

Par ailleurs, le nombre de scénarios longs ou propagation simulés dépend du type de l'évènement initial (cascade ou cause commune) et il est considéré que la perturbation majeure impacte le TcAE à $t=0$. La simulation débute alors après avoir introduit les conditions initiales d'une part d'une TcAE via les valeurs de demande des usagers et d'autre part des scénarios de propagation. L'extraction des valeurs des scénarios longs permet alors de déterminer des résultats sur l'état du TcAE à différents pas de temps de simulation.

Un algorithme de simulation permettant de propager les effets d'une perturbation majeure décomposé en quatre phases résume ces propos. Les conditions initiales du TcAE, les données de simulation et l'initialisation des scénarios longs, l'état des paramètres des scénarios longs ainsi que l'état du TcAE à chaque pas de temps constituent ces différentes phases (Figure 67) Figure 67 : Algorithme de simulation des scénarios longs.

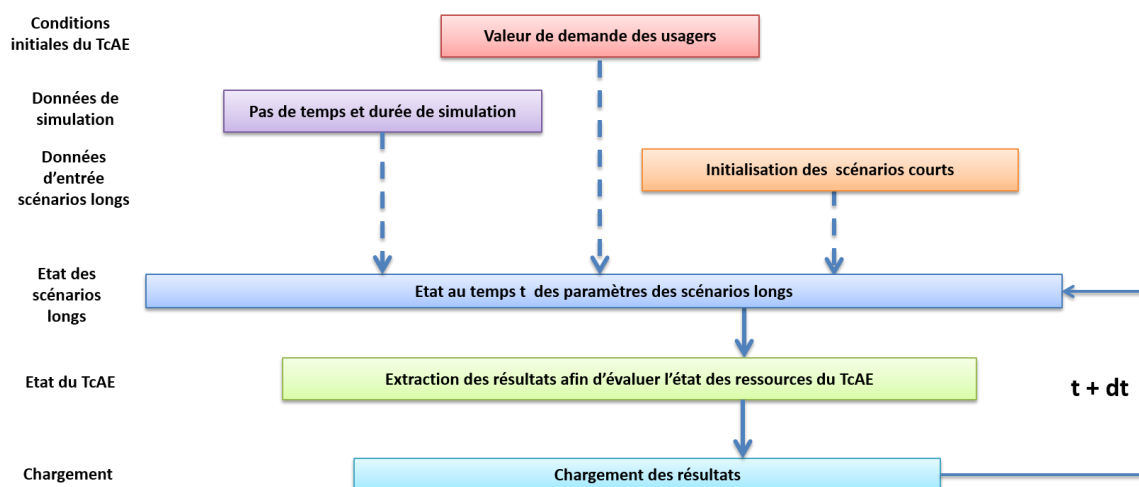


Figure 67 : Algorithme de simulation des scénarios longs

II-2.4.1 Conditions initiales des paramètres de demande du TcAE

Les valeurs de demandes des utilisateurs, des supports des éléments essentiels, des contraintes des fonctions essentielles ou d'association et des ressources externes sortantes du TcAE sont à indiquer avant de débiter la simulation (Tableau 10).

Ces valeurs de demandes avec la détermination des valeurs des coefficients de demande $\text{CoefDemande}(Bi, Sfj)$ et coefficients de conversion $\text{CoefConversion}(Ej \text{ ou } Si, FE \text{ ou } FA \text{ ou } \text{EnvironnementTcAE})$ permettent d'obtenir les valeurs de demande d'entrée et sortie des fonctions essentielles ou d'association des différentes séquences fonctionnelles.

Demande utilisateurs en entrées	$\text{DemandeEj}(Ej, Up, t)$	Unité d'entrée
Demande en support des éléments essentiels	$\text{DemandeSupl}(\text{Supl}, EEk, t)$	Unité du support
Demande en contrainte des fonctions	$\text{DemandeCm}(Cm, FEu \text{ ou } FAu, t)$	Unité des contraintes
Demande en ressource sortante de l'environnement TcAE	$\text{DemandeSi}(Si, \text{EnvironnementTcAE}, t)$	Unité de sortie

Tableau 10 : Valeurs d'entrée des demandes des usagers

II-2.4.2 Paramètres d'entrée initiaux des scénarios de propagation

i. Paramètres de la simulation

La durée et le pas de temps de simulation sont des paramètres de base de la simulation. La durée de simulation peut être déterminée à partir du retour d'expérience des événements passés afin de donner un ordre de grandeur de la persistance temporelle de la perturbation majeure. Pour cela, il est possible de s'inspirer de la base ARIA du Ministère de l'Écologie, du Développement Durable et de l'Énergie, sur les accidents technologiques. Par ailleurs, du fait des conditions invariantes pendant la simulation sur les coefficients de demande des séquences fonctionnelles et des demandes des usagers des services, il n'est pas pertinent que la durée de simulation dépasse plusieurs jours car des mesures organisationnelles auront été mises en place entre temps modifiant ainsi les conditions initiales.

D'autre part, le pas de temps de simulation est choisi selon les ressources qui vont être perturbées. Celui-ci peut se faire principalement à l'heure ou à la journée. Suivant le pas de temps choisi, il faudra veiller à assurer la cohérence des unités des ressources du TcAE.

ii. Initialisation des scénarios longs

Avant de débiter la simulation des scénarios longs, il convient de déterminer les valeurs des paramètres d'entrée de la perturbation majeure comme par exemple une valeur d'impact d'une perturbation externe sur un élément essentiel ou une valeur d'entrée utilisée par une fonction essentielle ou d'association.

D'autre part, les stocks et le service de sortie des fonctions essentielle ou d'association et le temps d'autonomie en ressources alternatives des supports des éléments essentiels à l'instant $t=T_{initial}$ sont à déterminer pour les scénarios courts simulés (Tableau 11). La disponibilité des éléments essentiels apparaissant dans les scénarios de propagation sont également à indiquer (Tableau 11).

Paramètres	Expression	Unités
Quantité de stocks de sortie Si	$QStocksSi(Si, Ej, FEu \text{ ou } FAu, t = T_{initial})$ $QStocksSi(Si, Cm, FE \text{ ou } FA, t = T_{initial})$ $QStocksSi(Si, Supl, EEk, FEu \text{ ou } FAu, t = T_{initial})$	Unité de sortie (lien avec le pas de temps de simulation)
Service de stocks de sortie Si	$ServiceSi(Si, Ej, FEu \text{ ou } FAu, t = T_{initial})$ $ServiceSi(Si, Cm, FE \text{ ou } FA, t = T_{initial})$ $ServiceSi(Si, Supl, EEk, FEu \text{ ou } FAu, t = T_{initial})$	Unité de sortie (lien avec le pas de temps de simulation)
Temps d'autonomie délivré par les ressources alternatives d'un support Supl d'un élément essentiel EEk	$TSupi(Supl, EEk, t = T_{initial})$	Pas de temps de simulation
Disponibilité d'un élément essentiel EEk	$Disponibilite(EEk, t)$	Pourcentage

Tableau 11 : Valeurs des paramètres d'initialisation des scénarios courts

II-2.4.3 Etat du TcAE

De par les nombreuses interdépendances, la simulation d'un ou plusieurs scénarios longs entraîne des répétitions et une multitude de perturbations sur un même élément essentiel, fonction essentielle ou groupe d'individus. Afin d'obtenir un résultat unique à chaque pas de temps de simulation, il est proposé de regrouper ou comparer plusieurs valeurs. Il est intéressant de se focaliser sur trois résultats : la perte d'activité des éléments essentiels, l'état des stocks de sortie des fonctions essentielles ou d'association et le nombre d'individus impactés d'une zone de référence.

i. Pertes d'activité des éléments essentiels

La perte d'activité d'un élément essentiel est influencée par l'utilisation des supports ou une perturbation externe et un flux de danger pouvant survenir. Dans la mesure où un support peut être utilisé plusieurs fois par un élément essentiel (par exemple, les individus actifs de plusieurs zones de référence), la perte d'activité d'un élément essentiel est estimée comme étant le maximum entre les pertes d'activité suite à une perturbation externe ou un flux de danger et la somme des pertes d'activités de l'élément essentiel suite à l'utilisation des supports.

L'expression suivante résume ces propos :

$$E_{jp}(EE_k, t) = \text{MAX}(\sum_{\text{Supl}=\text{sup1}}^{\text{supn}} E_{jp}(\text{supl}, EE_k, t) ; E_{jp}(EE_k, h \text{ ou } k, t)),$$

avec supl=sup1 à supn avec n le nombre de supports de l'EEk apparaissant dans les scénarios de propagation et h une perturbation d'origine externe et k un flux de danger

Par ailleurs, dans le cas où une perte d'activité d'un élément essentiel estimée suite à l'utilisation d'un même support apparaît plusieurs fois, la valeur maximale est retenue pour le calcul de la perte d'activité globale suite à l'utilisation des supports.

ii. Stocks de sorties des fonctions essentielles ou d'association

L'état des stocks de sortie Si dépend des valeurs d'opérabilité, de réalisation ou d'accomplissement de la fonction essentielle ou d'association. Deux phases articulent l'obtention de ce résultat.

Dans une première phase, les stocks de sortie à $t + dt$ sont évalués en tenant compte de l'état des stocks de Si à l'instant t et les nouveaux stocks de sortie Si à $t + dt$ dus à l'utilisation des entrées Ej ou des contraintes Cm et des supports de l'élément essentiel EEk réalisant la fonction essentielle ou d'association FEu ou FAu. Trois expressions résument ces propos :

$$Q_{\text{StocksSi}}(Si, \sum E_j, FEu \text{ ou } FAu, t + dt) = Q_{\text{StocksSi}}(Si, \sum E_j, FEu \text{ ou } FAu, t) - [\sum_{E_j=E_1}^{E_n} Q_{\text{StocksSi}}(Si, E_j, FEu \text{ ou } FAu, t) - Q_{\text{StocksSi}}(Si, E_j, FEu \text{ ou } FAu, t + dt)],$$

avec $E_j=E_1...E_n$ et n le nombre d'entrées de FEu ou FAu apparaissant dans les scénarios de propagation

$$Q_{\text{StocksSi}}(Si, \sum C_m, FEu \text{ ou } FAu, t + dt) = Q_{\text{StocksSi}}(Si, \sum C_m, FEu \text{ ou } FAu, t) - [\sum_{C_m=C_1}^{C_n} Q_{\text{StocksSi}}(Si, C_m, FEu \text{ ou } FAu, t) - Q_{\text{StocksSi}}(Si, C_m, FEu \text{ ou } FAu, t + dt)],$$

avec $C_m=C_1...C_n$ avec n le nombre de contraintes de FEu ou FAu apparaissant dans les scénarios de propagation

$$\begin{aligned} Q_{\text{StocksSi}}(Si, \sum \text{Supl}, EE_k, FEu \text{ ou } FAu, t + dt) &= Q_{\text{StocksSi}}(Si, \sum \text{Supl}, EE_k, FEu \text{ ou } FAu, t) \\ &- \sum_{\text{supl}=\text{sup1}}^{\text{supn}} Q_{\text{StocksSi}}(Si, \text{Supl}, EE_k, FEu \text{ ou } FAu, t) \\ &- Q_{\text{StocksSi}}(Si, \text{Supl}, EE_k, FEu \text{ ou } FAu, t + dt) \end{aligned}$$

avec supl = sup1...à supn avec n le nombre de supports de l'EEk apparaissant dans les scénarios de propagation

Par ailleurs, si une valeur des stocks de Si estimée suite à l'utilisation d'une même entrée ou d'une contrainte, ou d'un support identique apparaît plusieurs fois, c'est la valeur maximale de la somme entre les instants t et $t + dt$ qui est retenue.

Les nouveaux stocks de sortie sont alors estimés en prenant le minimum des stocks de sortie Si dus aux différents types de perturbations pouvant survenir sur les FEu ou FAu :

$$QStocksSi(Si, FEu \text{ ou } FAu, t + dt) = \min(QStocksSi(Si, \sum Ci, FA \text{ ou } FE, t + dt) ; QStocksSi(Si, \sum Supl, EE, FE \text{ ou } FA, t + dt); QStocksSi(Si, h \text{ ou } k, EE, FE \text{ ou } FA, t + dt) ; QStocksSi(Si, \sum Ej, FE \text{ ou } FA, t + dt)$$

iii. Individus impactés des zones de référence

Le nombre d'individus impactés d'une zone de référence ZRr est influencé par l'utilisation des entrées via ses utilisateurs ou une perturbation externe pouvant survenir via ses personnes.

Les individus impactés d'une zone de référence IndividusImpactes(ZRr, t) sont estimés par la valeur maximum entre le nombre d'individus impactés suite à une perturbation h et les valeurs des individus impactés par la perte des entrées de ses utilisateurs. L'expression suivante résume ces propos :

$$\text{IndividusImpactes}(ZRr, t) = \max(\text{IndividusImpactes}(h, Pf, ZRr, ZIb, t) ; \text{IndividusImpactes}(Ej, Up, ZRr, ZAa, t))$$

avec $Ej=E1$ à En avec n le nombre d'entrée des utilisateurs Up apparaissant dans les scénarios de propagation

Un pourcentage d'individus impactés peut ensuite être calculé à partir de cette valeur extraite et le nombre d'individus théoriques de la zone de référence.

L'extraction de trois résultats possibles des scénarios de propagation a été présentée. D'autres résultats sont possibles comme l'évolution de l'autonomie en support des éléments essentiels ou encore l'état des fonctions essentielles ou d'association. Ces choix sont alors à affiner suivant les motivations du développement d'une telle démarche.

Dans le cas où les utilisateurs souhaitent mettre en place une stratégie de résilience systémique en testant différents scénarios de propagation, il est nécessaire d'évaluer la résilience systémique du TcAE.

II-2.4.4 Vers une stratégie de résilience systémique

L'évaluation de la résilience systémique s'effectue dans le projet à partir de l'acceptabilité des différentes pertes de services subies par les éléments essentiels et les individus (Figure 68). Ces services correspondent aux sorties délivrées par chaque dernière fonction des différentes séquences fonctionnelles identifiées. Suivant les résultats de cette évaluation, des mesures de traitement des risques ou de planification de continuité/rétablissement d'activité peuvent être proposées pour chaque simulation.

Trois paramètres influencent l'acceptabilité des pertes de service. Il s'agit du pourcentage de perte de service, la durée de perte de service et la cinétique de la perte de service par rapport à la perturbation initiale. Des matrices de tolérance sont à construire dans un premier temps tenant compte du pourcentage et de la durée des pertes de services. Les matrices sont distinctes pour les éléments essentiels et les individus. Les seuils sont alors à identifier permettant de déterminer si la perte de service est tolérée ou non. Si cette perte de service est tolérée alors elle est également acceptable. Dans l'autre cas cela va dépendre de la cinétique où intervient cette perte de service du fait que les opérateurs peuvent s'organiser en interne (avec le matériel et les individus actifs disponibles) afin de mettre en place des mesures réduisant le pourcentage ou le temps de perte de service. Selon la valeur de temps limite, une cinétique de perte de service peu espacée de la perturbation initiale va alors engendrer des conséquences inacceptables. Des mesures de résilience systémique devront être prises à partir de l'étude de différentes solutions proposées à l'échelle du TcAE selon l'ensemble des pertes de services inacceptables. Ces solutions envisagées en fonction des coûts et contraintes de conception et réalisation permettent d'établir une véritable stratégie de résilience systémique du TcAE selon la perturbation majeure identifiée.

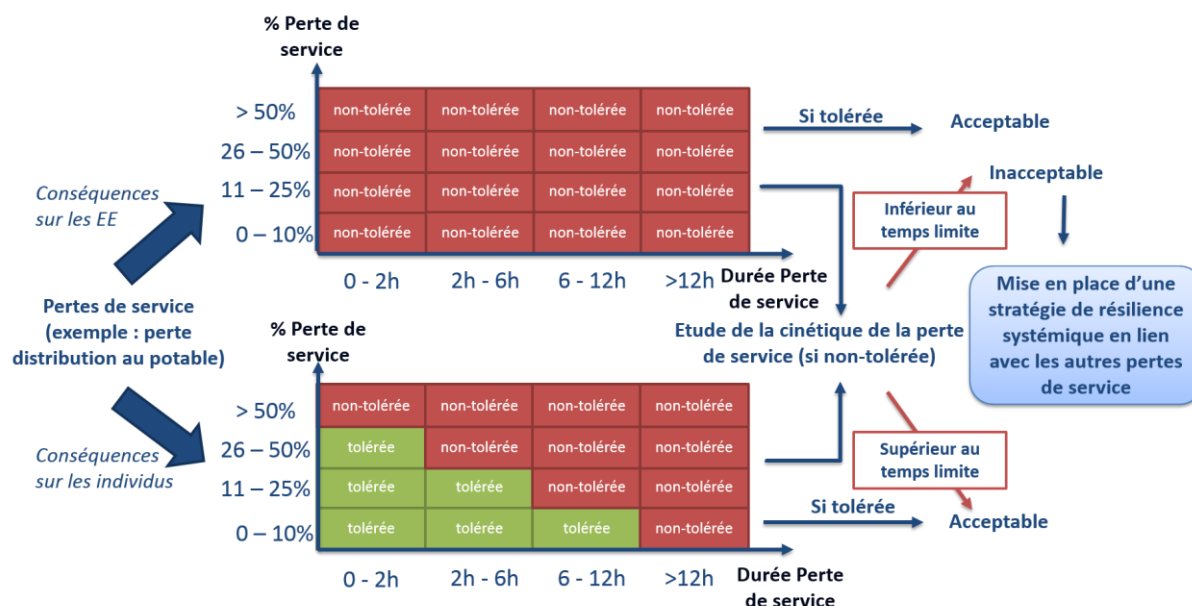


Figure 68 : Acceptabilité des pertes de services

II-2.5. Synthèse

Une synthèse de la démarche méthodologique articulée en trois étapes est présentée ci-dessous. En parallèle et afin de faciliter la mise en application de la démarche proposée, trois schémas résument les étapes méthodologiques principales avec les paramètres importants à connaître ou à calculer lors d'une simulation (Figure 69 ; Figure 70 ; Figure 71).

La première étape a consisté à construire le modèle du TcAE dans un environnement à risque. Les éléments essentiels sont les premières ressources à identifier. Ils permettent de constituer les différentes chaînes essentielles. La liste des supports est également établie. Puis, l'identification des fonctions essentielles ou d'association est réalisée à partir de la liste des éléments essentiels conduisant à constituer l'ensemble des séquences fonctionnelles. Les entrées, sorties et contraintes sont également déterminées. La mise en place de ces différentes ressources et fonctions essentielles ou d'association s'appuie sur des typologies communes à l'ensemble des TcAE. Le travail de construction est ainsi facilité. Par ailleurs, une liste des perturbations externes sur les éléments essentiels et les personnes est élaborée. Celle-ci se base également sur une typologie existante. Les flux de danger des éléments essentiels potentiels sources de danger sont également saisis.

Les liens entre ces scénarios courts et les ressources entrantes et sortantes du TcAE sont formalisés à partir d'une matrice des liens. Sept enchaînements distincts forment des scénarios courts. Ces derniers sont construits à partir de l'étude des causes et effets des défaillances des fonctions essentielles ou d'association, défauts des éléments essentiels et l'affaiblissement des individus. A l'intérieur de la matrice, quatre types de liens sont identifiés et mettent en avant l'influence et la dépendance des scénarios courts et ressources externes entrantes et sortantes. Il s'agit des liens fonctionnels, géographique, individus ou élément essentiel/fonction essentielle ou d'association. Les liens fonctionnels mettent en avant des échanges de ressources dénombrables caractérisées par des règles de priorité spécifiant le contexte de gestion de crise dans lequel s'inscrit la démarche méthodologique. Cet outil de formalisation permet de visualiser l'enchaînement d'une perturbation au sein du TcAE via l'enchaînement en cascade des perturbations. L'analyse de la matrice permet d'identifier les scénarios courts ou ressources de l'environnement du TcAE les plus influents ou dépendants.

La configuration des scénarios de propagation amène à introduire les expressions littérales des paramètres de demande des séquences fonctionnelles en tenant compte des coefficients de demande et de conversion ainsi que les valeurs de plusieurs paramètres invariants. Puis, les scénarios courts contenant les éléments essentiels, fonctions essentielles ou d'association et individus sont configurés distinctivement en tenant compte notamment des paramètres des capacités d'absorption et de remise en service des ressources du TcAE.

L'opérabilité des éléments essentiels ou fonctions essentielles ou d'association ainsi que la disponibilité et mobilité des utilisateurs sont évaluées à partir des paramètres de demande et service des entrées et supports. Les demandes des entrées dépendent de la demande des usagers en bout de séquence fonctionnelle. D'autre part, les demandes de supports correspondent en partie à la demande des usagers adressée en bout de séquence fonctionnelle. En cas de manque de support par rapport à sa demande, un paramètre d'autonomie du support permet de tenir compte d'éventuelles ressources alternatives (exemple : groupes électrogènes). Ces ressources alternatives ne sont pas alimentées (exemple : approvisionnement de carburants pour les groupes électrogènes) au cours de

la simulation.

L'intégrité des éléments essentiels et des personnes suite à une perturbation externe ou un flux de danger (uniquement pour les éléments essentiels) est fonction d'une valeur d'impact. Pour des perturbations externes différentes mais avec une même valeur d'impact, les résultats du scénario de propagation sont donc identiques. Cela s'explique par notre volonté d'étudier en priorité les impacts directs et indirects d'un événement initial et non les causes. Par ailleurs, la durée de remise en service est également fonction de l'impact et d'une durée de remise en service maximale. La propagation spatiale de la perturbation majeure dépend de la valeur d'intégrité de l'élément essentiel émettant le flux de danger.

La réalisation des fonctions essentielles ou d'association est évaluée en fonction de la demande et du service en contrainte. Cette ressource correspond à des informations qui influencent l'état de la fonction essentielle ou d'association. L'étude des ressources se faisant uniquement de manière quantitative, les demandes et services s'étudient de manière binaire.

L'accomplissement des fonctions essentielles ou d'association est évalué en fonction de la perte d'activité d'un élément essentiel et son coefficient d'impact fonctionnel. Ce dernier mesure le poids de l'élément essentiel dans la réalisation de la fonction essentielle ou d'association. Une perturbation subie par l'élément essentiel se traduit en conséquence sur la réalisation d'une ou plusieurs fonctions essentielles ou d'association qu'il réalise.

Les paramètres d'opérabilité, réalisation et accomplissement de la fonction essentielle ou d'association influencent le calcul des stocks et service de sortie.

En ce qui concerne les utilisateurs, la disponibilité et mobilité sont estimées en fonction de la demande en entrée (pour une zone d'alimentation donnée). L'intégrité des personnes est également évaluée suite à une perturbation externe. Le nombre d'individus actifs d'un élément essentiel d'une zone de référence pouvant se rendre à son travail est influencé par ses valeurs de disponibilité, mobilité ou intégrité et du facteur de forme entre les zones d'alimentation ou d'impact et les zones de références.

La dernière étape méthodologique concerne la simulation d'un ou plusieurs scénarios de propagation afin d'évaluer la résilience systémique du TcAE.

Les scénarios de propagation comportent plusieurs ramifications illustrant les liens d'interdépendances à différents ordres. Ces nombreuses interdépendances engendrent des ramifications étendue ou qui ne s'arrêtent pas (boucles de scénarios courts). De plus, les différentes branches des séquences fonctionnelles accentuent la complexité d'extraction des résultats. Les ramifications sont alors stoppées lorsque trois séquences fonctionnelles distinctes via les fonctions essentielles ou d'association réalisées, apparaissent dans une même ramification.

Avant de débiter la simulation, les valeurs des paramètres de demandes des usagers pour l'ensemble des séquences fonctionnelles sont à indiquer (=conditions initiales du TcAE). Puis, les paramètres de simulations sont introduits (durée, pas de temps, quantité de stocks de sortie à $t=0, \dots$). L'extraction des résultats est effectuée afin d'obtenir des valeurs uniques de perte d'activité des éléments essentiels, stocks de sorties des fonctions essentielles ou d'association et les individus impactés d'une zone de référence à différents pas de temps. En effet, les scénarios de propagations sont constitués de liens en cascades obligeant ainsi à assembler plusieurs valeurs d'état des ressources afin de prendre en compte les effets escalades.

La simulation de plusieurs scénarios de propagation ou des mêmes scénarios de propagation avec des valeurs de données initiales différentes conduit à proposer des mesures de résilience systémique.

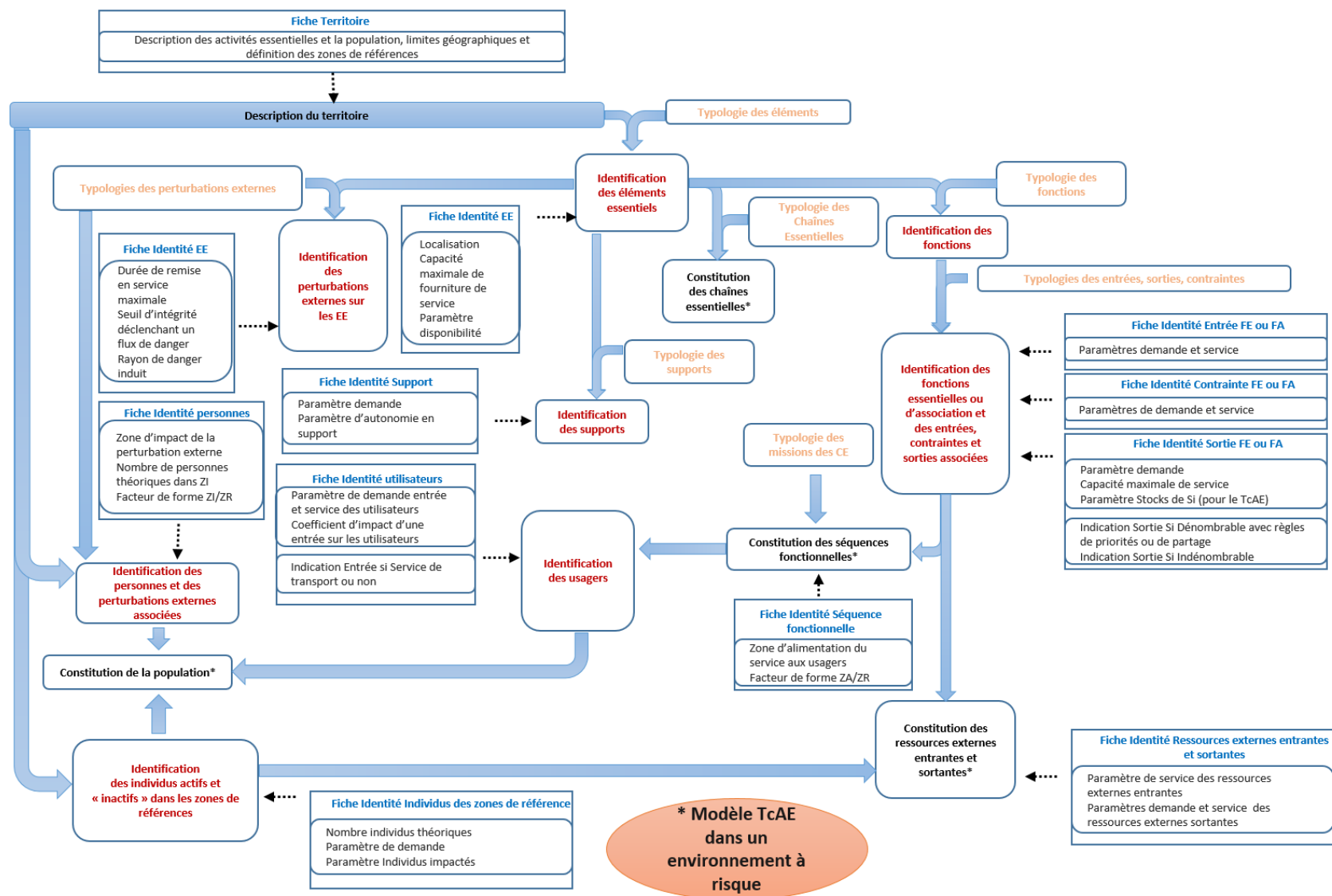


Figure 69 : Schéma récapitulatif de l'Etape A

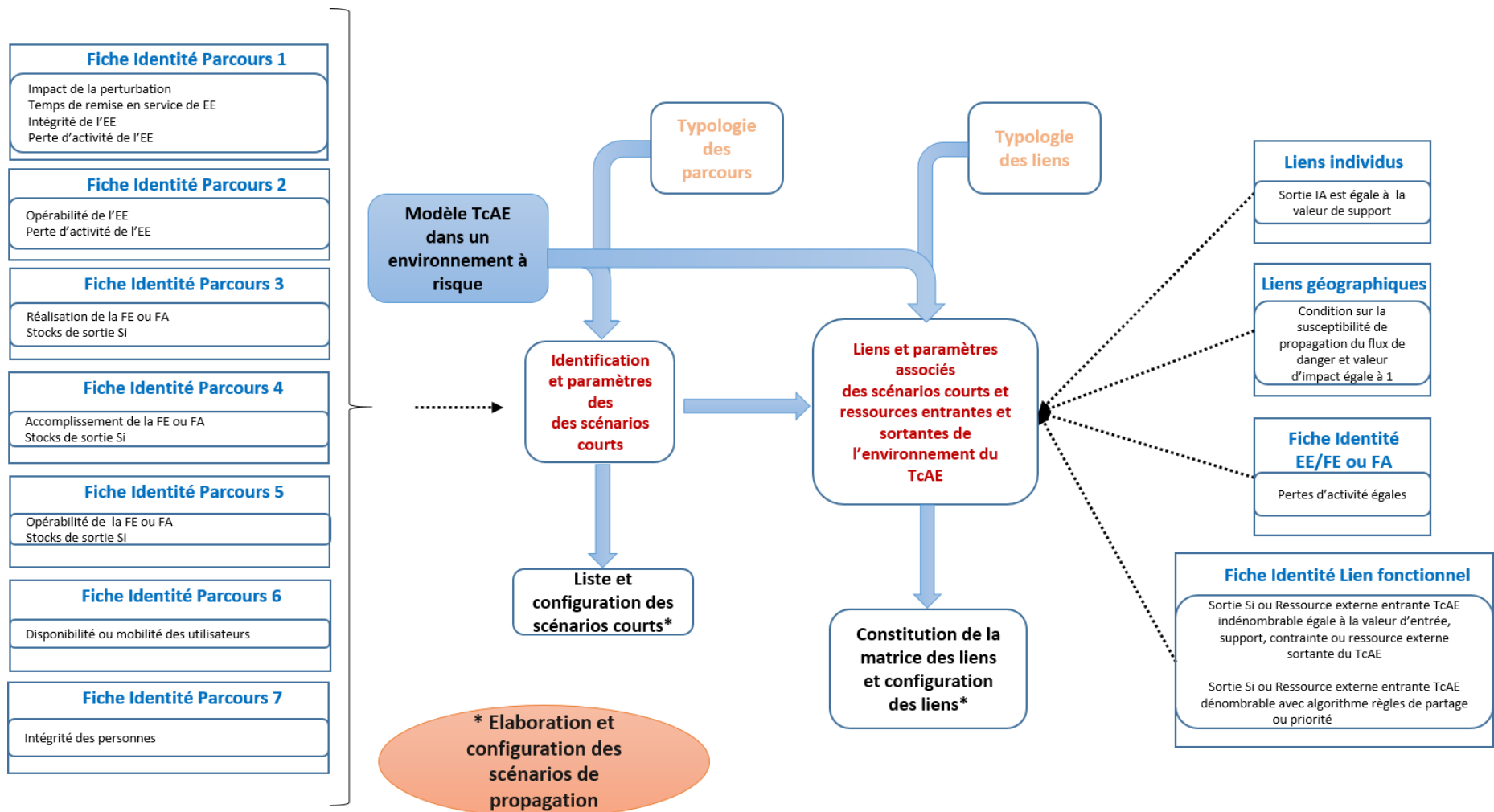


Figure 70 : Schéma récapitulatif scénarios, Etape B

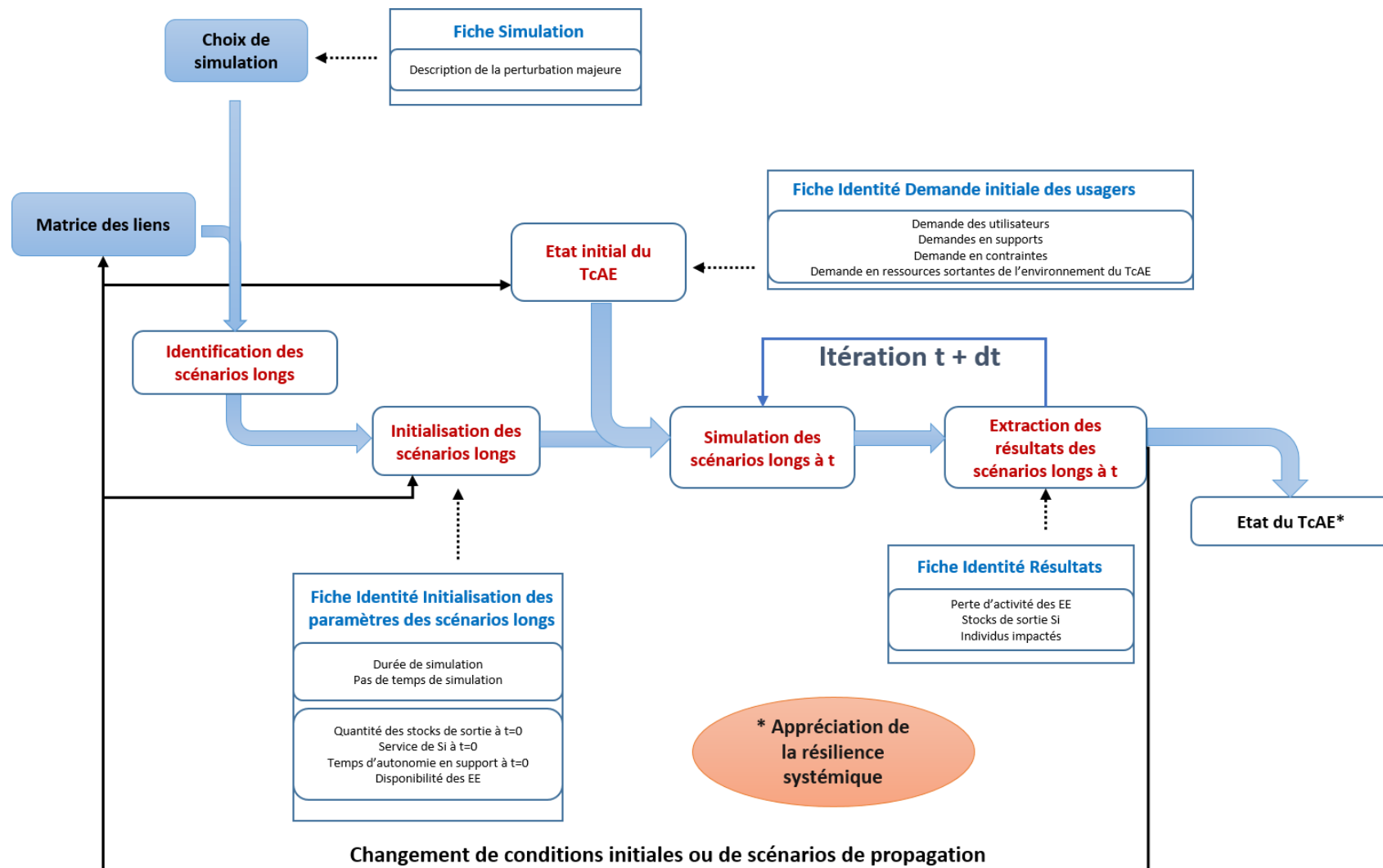


Figure 71 : schéma récapitulatif Etape C

II-3. Application à un TcAE Pilote

II-3.1. Description du TcAE Pilote

Dans cette partie, la méthodologie est appliquée à un Territoire composé d'Activités Essentielles « Pilote » à l'échelle départementale. Par ailleurs, le cas d'application retenu s'appuie sur des échanges qui ont eu lieu avec des opérateurs d'activités essentielles de l'Energie, de la Santé et de la Gestion de l'eau à l'échelle du département. Toutefois, dans la mesure où aucun contrat ou accord entre les parties prenantes n'a été signé et que par ailleurs plusieurs modifications ont été apportées au territoire, ce dernier est présenté de façon anonyme. On parlera alors du TcAE Pilote.

D'autre part, en raison de l'ampleur de la tâche à cette échelle en l'absence d'un outil informatique finalisé, seule la partie Nord-Ouest du territoire d'étude est décrite de façon détaillée. Au terme de la rédaction de ce manuscrit, le développement de l'outil informatique est effectué jusqu'à la construction de la matrice des liens.

Ce territoire compte 650 000 individus et 230 communes. Les différents modes de transport sont présents à l'exception du mode fluvial. Dans la suite, la description des activités essentielles est réalisée pour l'ensemble du département. Toutefois, l'étude se concentrera essentiellement sur les enjeux situés au nord-ouest du territoire.

La première phase consiste en l'identification et la description des activités essentielles pour aboutir à la construction du modèle du TcAE dans un environnement à risque. Les activités essentielles du TcAE Pilote sont relatives à la gestion de l'eau, à l'énergie, à la santé, à l'alimentation, à la gouvernance et au transport. Les zones de référence ont été déterminées et reportées sur la Figure 72 afin de faciliter l'identification des individus. L'étendue et les limites des zones de référence ont été établies sur la base de trois agglomérations principales du département. ZR1 comporte 200 000 individus, ZR2 150 000 individus alors que 300 000 individus se trouvent dans ZR3.

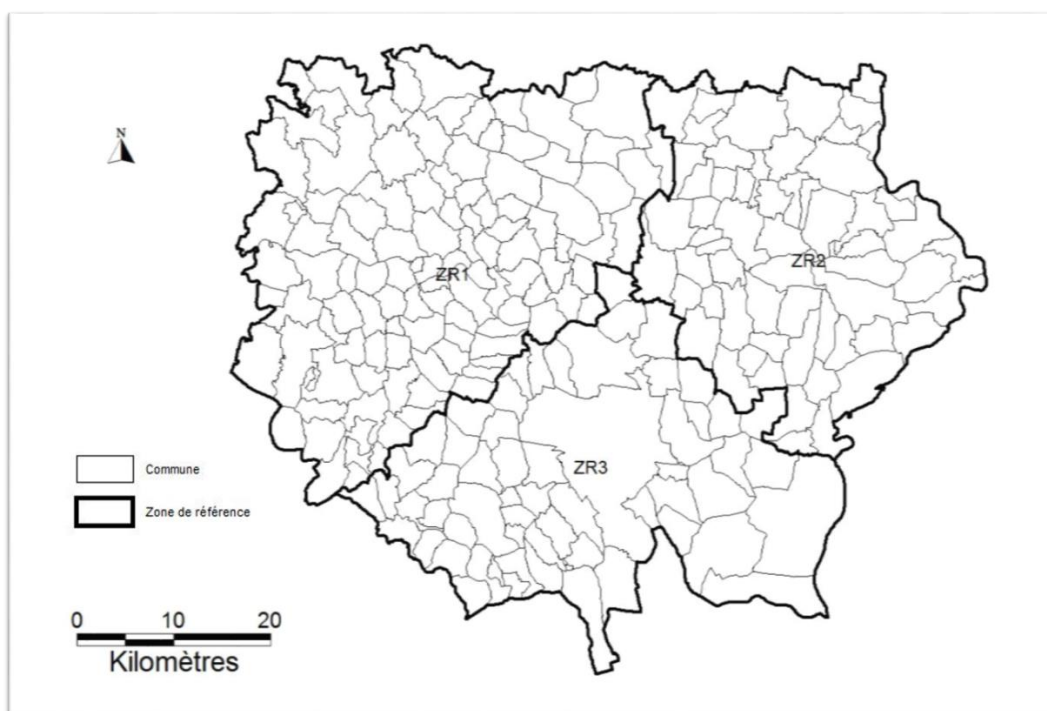


Figure 72 : Cartes du TcAE pilote avec les zones de référence

II-3.1.1 Activités gestion de l'eau

Plusieurs réseaux d'eau potable existent sur le TcAE Pilote car cette ressource est gérée au niveau local. Dans le cadre de cette description, notre attention se porte sur un seul réseau de fourniture d'eau potable qui est localisé sur vingt-neuf communes du TcAE. Ce réseau situé dans la zone de référence 1 dessert 70 000 individus et un centre hospitalier appelé 'CH1'. La commune A accueille l'élément CH1 et 40 000 individus.

La ressource « eau du milieu naturel » est prélevée dans deux cours d'eau distincts. Ce réseau d'eau potable (REP) est composé de :

- Trois stations de captage de l'eau (SCE) dénommées SCEA, SCEB et SCEC reliées indépendamment à trois stations de production de l'eau (SPE) SPEA, SPEB et SPEC situées à proximité de la zone de captage. Les stations de captage et production SPE A et C disposent d'une fourniture de service maximal de 750 m³/h. Les stations de captage B et de production B disposent d'une capacité de 500 m³/h.
- Des canalisations de transport d'eau potable et des nœuds d'interconnexion pour relier les stations de production et les réservoirs d'eau potable avec un débit de 2500m³/h ;
- Dix réservoirs RE, A à J d'eau potable dont trois de grande capacité (entre 10 000 et 20 000 m³) et sept plus petits (entre 1000 et 3000 m³). La capacité de stockage totale est de 50 000 m³. Les réservoirs d'eau potable alimentent des réseaux gravitaires.
- Des canalisations de distribution et des nœuds d'interconnexion reliant les réservoirs d'eau potable et les différents usagers du service de distribution d'eau potable avec un débit de 2500m³/h ;

Il est considéré que l'eau potable produite par les stations de production passe obligatoirement par les réservoirs d'eau potable. De plus, le réseau des canalisations de distribution d'eau potable alimentant les usagers sont fortement maillés.

Les stations de captage d'eau du milieu naturel, de production d'eau potable et les réservoirs d'eau potable décrits ci-dessus sont supervisés à distance par un centre de pilotage qui transmet des informations par les télécommunications internet. Ce centre est unique à ce réseau d'eau potable et a besoin en permanence pour fonctionner de deux individus actifs (domiciliés dans la commune A).

De la même manière que pour la fourniture et le pilotage des réseaux d'eau potable, plusieurs réseaux d'assainissement des eaux usées existent sur le TcAE. Il est choisi de s'intéresser à un seul réseau des eaux usées. Les individus et communes desservis par ce service d'assainissement sont identiques au service d'eau potable décrit précédemment. La collecte des eaux usées est réalisée par un ensemble de canalisations et nœuds de connexions qui permettent d'évacuer cette ressource vers une unique station d'épuration. L'assainissement des eaux usées est supervisé à distance (via internet) par un centre de pilotage propre à ce réseau et nécessite deux individus actifs en permanence pour fonctionner. Ces personnes sont domiciliées dans les communes avoisinantes de la commune A (compris dans la zone de référence 1).

II-3.1.2 Activité essentielle Energie

Une centrale nucléaire est présente sur le territoire. Sa production d'électricité alimente le réseau de transport d'électricité déjà présent sur le département via des lignes HTB et nœuds de connexion. Le réseau de transport alimente différents postes sources du département desservant ensuite les usagers. La commune A et plusieurs communes

voisines sont notamment desservies par trois postes sources distincts (PSE-A, PSE-B et PSE-C) alimentant chacun 15 000 individus indépendamment. Le centre hospitalier 'CH1', la mairie de la commune A, des stations-service SS A/B/C/D/E et les infrastructures du réseau d'eau potable et eaux usées auparavant décrites sont notamment alimentées par ces différents postes sources (Tableau 12). Le centre hospitalier CH1 est alimenté par deux postes distincts (redondance d'alimentation électrique).

	PSE A	PSE B	PSE C
Station de captage A	X		
Station de captage B		X	
Station de captage C			X
Station de production d'eau potable A	X		
Station de production d'eau potable B		X	
Station de production d'eau potable C			X
Station d'épuration	X		
Centre de pilotage eau potable		X	
Centre de pilotage eaux usées			X
Centre hospitalier CH1	X	X	
Mairie A	X		
Station-service A	X		
Station-service B	X		
Station-service C		X	
Station-service D		X	
Station-service E			X

Tableau 12 : Alimentation électrique des postes source A/B/C

Les postes sources sont pilotés à distance par un centre de supervision régional qui distribue des informations par les télécommunications internet. Ce centre ne se situe pas dans le département.

Le réseau de gaz naturel alimente TcAE Pilote à partir d'un ensemble de canalisations et nœuds de connexions. Le territoire d'études ne dispose pas de station de compression, de centre de stockage ou terminal méthanier, de centre de supervision régional.

La distribution d'essences et de gazole se fait à l'aide de plusieurs stations-service présentes sur le territoire. Cinq stations-service A/B/C/D/E desservent les individus en gazole et essences dans la commune A. Ces stations sont totalement automatisées et ne nécessitent pas de personnel. Les autres stations-service du TcAE ne sont pas retenues

dans cette application.

Par ailleurs, un dépôt pétrolier est situé dans la zone de référence 3 stockant des essences, gazole, fioul domestique et carburéacteur. Ce dépôt est alimenté par le transport routier et dessert l'ensemble des stations-service du département pour les ressources de type essences et gazole. Le fioul lourd et le carburéacteur sont distribués à partir du dépôt par des camions citernes aux usagers du département. Le fonctionnement du dépôt exige dix individus actifs en permanence. Ils sont domiciliés dans cette zone de référence. D'autre part, du fait de la nature et de la quantité des produits stockés, le dépôt peut être à l'origine d'un flux de danger et est soumis à autorisation avec servitude via la réglementation Française des Installations Classées pour la Protection de l'Environnement (ICPE). Par ailleurs, aucune raffinerie n'est recensée sur le TcAE.

II-3.1.3 Activité essentielle Santé

Plusieurs établissements de santé se trouvent sur le territoire pilote. Parmi-eux, le centre hospitalier dit 'CH1' se trouve sur la commune A. Il dispense des soins à plus de 70 000 individus, qui sont par ailleurs ceux du réseau d'eau potable (REP) qui dessert également ce centre hospitalier.

Par ailleurs, il utilise de l'électricité provenant des postes sources A et B décrits ci-avant. Il est le seul établissement de santé identifié dans cette description restreinte du TcAE Pilote. Par ailleurs, il est considéré que les 450 employés de CH1 se répartissent de manière équivalente entre les différentes zones de référence mises en évidence. D'autre part, CH1 utilise les produits essentiels d'un dépôt du TcAE (localisé en zone de référence 3). Celui-ci alimente par voie routière l'ensemble des usagers du département et des départements limitrophes. Les usagers de ces produits ne se sont pas décrits ici (autres établissements de santé, pharmacies,...).

Le fonctionnement du dépôt exige dix employés domiciliés également dans la zone de référence 3. Il n'y a aucun industriel de production de ces produits sur le département Pilote.

II-3.1.4 Activité essentielle Alimentation

La distribution des produits alimentaires de première nécessité aux différents points de vente se fait par le réseau routier. Ces produits proviennent des dépôts alimentaires de grossistes du département (DA-A et DA-B) qui sont eux-mêmes alimentés par le réseau routier via des fournisseurs externes au TcAE. Le dépôt DA-A est localisé dans la zone de référence 2 alors que DA-B se situe dans la troisième zone. Leur fonctionnement nécessite vingt-quatre individus actifs chacun provenant de manière équivalente des trois zones de référence. Il n'y a aucun industriel de production de ces produits dans le département.

II-3.1.5 Activité essentielle gouvernance TcAE

Le TcAE pilote décrit est un territoire à l'échelle départementale. La préfecture et l'ensemble des 350 mairies constituent les organes de gouvernance. La mairie A transmet des informations aux 40 000 individus de sa commune et utilise de l'électricité provenant du poste source C. Vingt individus actifs sont nécessaires au fonctionnement de la mairie et proviennent de manière équivalente des zones de référence 1 et 3.

Les informations utilisées par l'ensemble des Mairies proviennent de la Préfecture. Cette dernière reçoit les informations des différents centres de pilotage. Ces informations sont traitées par vingt individus actifs domiciliés dans la ZR3.

II-3.1.6 Activité essentielle transport individus

Le département possède un aéroport de type moyen-courrier. Cet aéroport a un flux d'environ mille individus par jour et a besoin de cinquante individus actifs pour fonctionner. Ces derniers sont domiciliés pour moitié dans la même localité que l'aéroport, en zone de référence 3, et pour l'autre moitié en zone de référence 1.

Le TcAE possède une gare TGV, un ensemble de gares régionales (TER et train-inter-cités). La gare de la ville préfecture permet d'avoir accès à l'ensemble des trains et possède un flux d'environ cent mille individus par jour. Les autres gares accueillent uniquement les TER et Intercités à partir d'un réseau ferroviaire fortement maillé. La ville A possède une de ces gares avec un flux de dix mille individus par jour. Les gares préfecture et Mairie A situées respectivement en ZR3 et ZR1 utilisent respectivement cinquante et vingt individus actifs (domiciliés respectivement en ZR3 et ZR1).

Les voies routières communales, départementales et nationales et différents nœuds de connexions constituent l'ossature du réseau routier. Une voie autoroutière passe également au Sud du département et est connectée aux autres voies routières par différents échangeurs.

II-3.2. Modèle restreint TcAE Pilote dans un environnement à risque

II-3.2.1 Constitution des chaînes essentielles

La description du territoire et la typologie des éléments permettent d'identifier dans un premier temps les éléments essentiels du TcAE. Les chaînes essentielles sont alors constituées. L'identification des éléments essentiels entraîne la détermination des supports utilisés et des perturbations externes subies ou émises. Le déroulement de la démarche est illustré avec les chaînes essentielles d'eau potable et d'eaux usées. Des commentaires sur les autres chaînes essentielles sont effectués ensuite.

i. Identification des éléments essentiels des chaînes essentielles eau potable (CE1) et eaux usées (CE2)

Dans le cadre de ce modèle restreint TcAE Pilote, une chaîne essentielle d'eau potable et une d'eaux usées sont reconstituées car l'ensemble des éléments essentiels qui les constituent sont connectés. Les éléments essentiels qui les composent sont localisés dans la zone de référence 1. Vingt-deux éléments essentiels sont recensés (Tableau 13 ; Figure 73). Du fait des redondances existantes, les éléments nœuds et canalisations sont regroupés pour former un seul élément essentiel.

EE1	Station de captage A (SCE A)	EE12	Réservoir eau potable E (RE E)
EE2	Station de captage B (SCE B)	EE13	Réservoir eau potable F (RE F)
EE3	Station de captage C (SCE C)	EE14	Réservoir eau potable G (RE G)
EE4	Station de production d'eau potable A (SPE A)	EE15	Réservoir eau potable H (RE H)
EE5	Station de production d'eau potable B (SPE B)	EE15	Réservoir eau potable I (RE I)
EE6	Station de production d'eau potable C (SPE C)	EE16	Réservoir eau potable J (RE J)
EE7	Regroupement des canalisations de transport eau potable et nœuds de connexion	EE17	Regroupement des canalisations de distribution eau potable et nœuds de connexion
EE8	Réservoir eau potable A (RE A)	EE18	Regroupement des canalisations des eaux usées et nœuds de connexion
EE9	Réservoir eau potable B (RE B)	EE19	Station d'épuration (SEE)
EE10	Réservoir eau potable C (RE C)	EE20	Centre de pilotage de fourniture de l'eau potable
EE11	Réservoir eau potable D (RE D)	EE21	Centre de pilotage d'assainissement des eaux usées

Tableau 13 : Liste des éléments essentiels composant CE1 et CE2

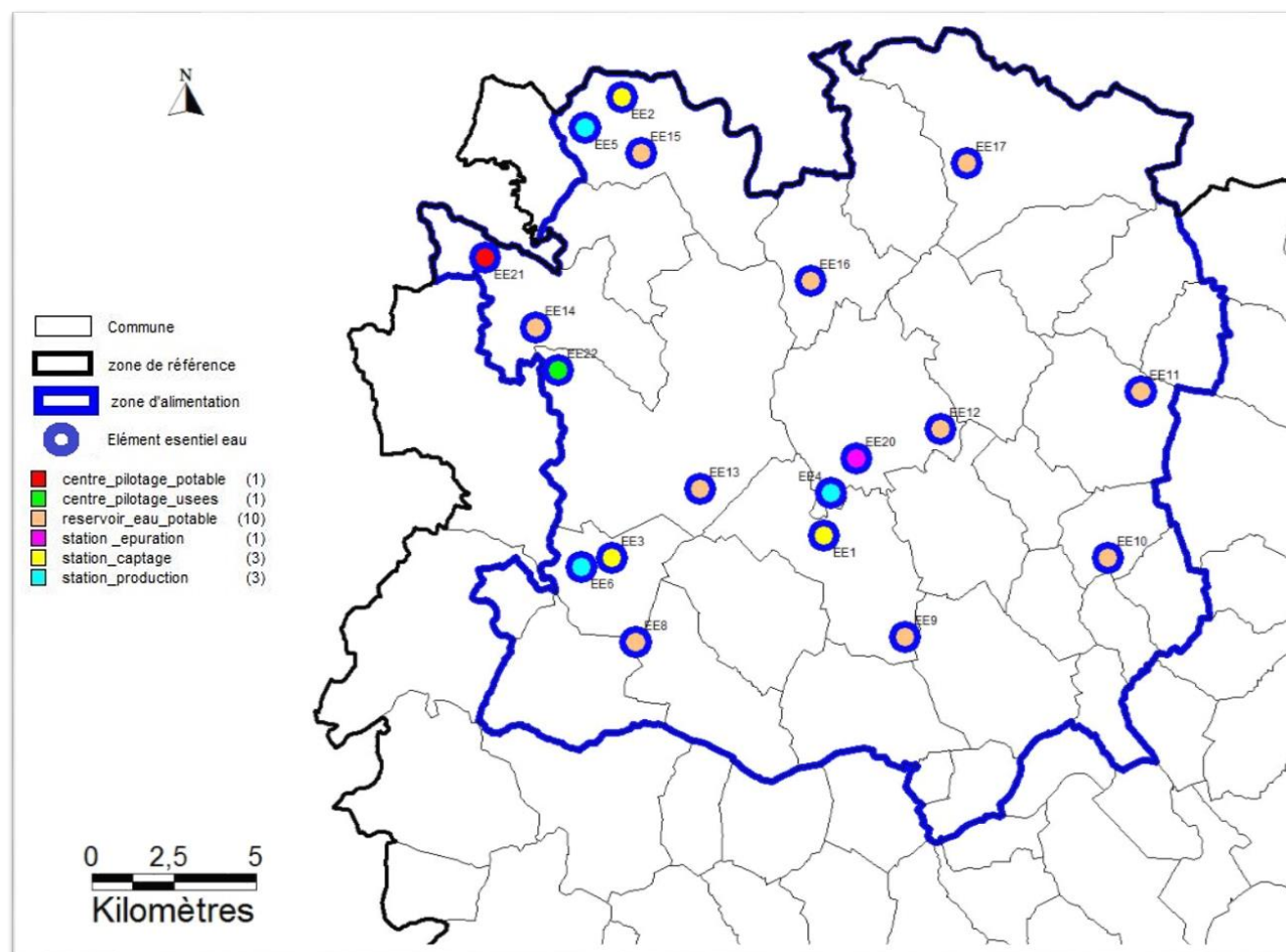


Figure 73 : Cartes des éléments essentiels des CE1 et CE2

La géolocalisation de ces éléments essentiels (Figure 73) est également effectuée afin de pouvoir prendre en compte les flux de danger potentiels entre l'ensemble des éléments essentiels du territoire (uniquement pour les éléments nœuds). Le paramètre de disponibilité ($\text{Dispo}(\text{EE}_k, t)$) et les valeurs de capacité maximale de service ($\text{Cmax}(\text{EE}_k)$) sont renseignés dans leur fiche d'identité (Tableau 14).

	Paramètres disponibilité	Capacité maximale de service		Paramètres disponibilité	Capacité maximale de service de l'EE
EE1	$\text{Dispo}(\text{EE1}, t)$	$\text{Cmax}(\text{EE1})$ = 750 m ³ /h	EE12	$\text{Dispo}(\text{EE12}, t)$	$\text{Cmax}(\text{EE12})$ = 2000 m ³
EE2	$\text{Dispo}(\text{EE2}, t)$	$\text{Cmax}(\text{EE2})$ = 500 m ³ /h	EE13	$\text{Dispo}(\text{EE13}, t)$	$\text{Cmax}(\text{EE13})$ = 1000 m ³
EE3	$\text{Dispo}(\text{EE3}, t)$	$\text{Cmax}(\text{EE3})$ = 750 m ³ /h	EE14	$\text{Dispo}(\text{EE14}, t)$	$\text{Cmax}(\text{EE14})$ = 1000 m ³ /h
EE4	$\text{Dispo}(\text{EE4}, t)$	$\text{Cmax}(\text{EE4})$ = 750 m ³ /h	EE15	$\text{Dispo}(\text{EE15}, t)$	$\text{Cmax}(\text{EE15})$ = 1000 m ³ /h
EE5	$\text{Dispo}(\text{EE5}, t)$	$\text{Cmax}(\text{EE5})$ = 500 m ³ /h	EE16	$\text{Dispo}(\text{EE16}, t)$	$\text{Cmax}(\text{EE16})$ = 1000 m ³ /h
EE6	$\text{Dispo}(\text{EE6}, t)$	$\text{Cmax}(\text{EE6})$ = 750 m ³ /h	EE17	$\text{Dispo}(\text{EE17}, t)$	$\text{Cmax}(\text{EE17})$ = 1000 m ³ /h
EE7	$\text{Dispo}(\text{EE7}, t)$	$\text{Cmax}(\text{EE7})$ = 2500m ³ /h	EE18	$\text{Dispo}(\text{EE18}, t)$	$\text{Cmax}(\text{EE18})$ = 2500m ³ /h
EE8	$\text{Dispo}(\text{EE8}, t)$	$\text{Cmax}(\text{EE8})$ = 20000 m ³	EE19	$\text{Dispo}(\text{EE19}, t)$	$\text{Cmax}(\text{EE19})$ = 70 000 équivalent habitant
EE9	$\text{Dispo}(\text{EE9}, t)$	$\text{Cmax}(\text{EE9})$ = 10000 m ³	EE20	$\text{Dispo}(\text{EE20}, t)$	$\text{Cmax}(\text{EE20})$ = 70 000 équivalent habitant
EE10	$\text{Dispo}(\text{EE10}, t)$	$\text{Cmax}(\text{EE10})$ = 10000 m ³	EE21	$\text{Dispo}(\text{EE21}, t)$	$\text{Cmax}(\text{EE21}) = 1$
EE11	$\text{Dispo}(\text{EE11}, t)$	$\text{Cmax}(\text{EE11})$ = 3000 m ³	EE22	$\text{Dispo}(\text{EE22}, t)$	$\text{Cmax}(\text{EE22}) = 1$

Tableau 14 : Paramètres de disponibilité et capacité maximale de service des éléments essentiels de CE1 et CE2

ii. Identification des supports

Afin de compléter la caractérisation des éléments essentiels, il est nécessaire d'identifier les supports utilisés et les paramètres de demande et de services pour chacun d'entre eux (Tableau 15).

Supports		Paramètres de demande	Paramètres de service
Sup2	Distribution électricité ZA2 EE1	DemandeSupl(Sup2, EE1, t)	ServiceSupl(Sup2, EE1, t)
Sup3	Distribution électricité ZA3 EE2	DemandeSupl(Sup3, EE2, t)	ServiceSupl(Sup3, EE2, t)
Sup4	Distribution électricité ZA4 EE3	DemandeSupl(Sup4, EE3, t)	ServiceSupl(Sup4, EE3, t)
Sup6	Individus actifs ZR1 centre de pilotage réseau eau potable	DemandeSupl(Sup6, EE21, t)	ServiceSupl(Sup3, EE21, t)
Sup7	Individus actifs ZR1 centre de pilotage réseau eaux usées	DemandeSupl(Sup7, EE22, t)	ServiceSupl(Sup7, EE22, t)
Sup26	Distribution électricité ZA2 EE4	DemandeSupl(Sup26, EE4, t)	ServiceSupl(Sup26, EE4, t)
Sup27	Distribution électricité ZA3 EE5	DemandeSupl(Sup27, EE5, t)	ServiceSupl(Sup27, EE5, t)
Sup28	Distribution électricité ZA4 EE6	DemandeSupl(Sup28, EE6, t)	ServiceSupl(Sup28, EE6, t)
Sup29	Distribution électricité ZA2 EE20	DemandeSupl(Sup29, EE20, t)	ServiceSupl(Sup29, EE20, t)
Sup30	Distribution électricité ZA3 EE21	DemandeSupl(Sup30, EE21, t)	ServiceSupl(Sup30, EE21, t)
Sup31	Distribution électricité ZA4 EE22	DemandeSupl(Sup31, EE22, t)	ServiceSupl(Sup31, EE22, t)

Tableau 15 : Liste des supports utilisés par les EE des CE1 et CE2 avec les paramètres de demande et de service

iii. Liste des perturbations externes émises et subies

Les perturbations externes subies et émises (catégories catastrophes naturelles /environnementales/ sanitaires ; accidents industriels ; menaces intentionnelles) par les éléments essentiels des chaînes essentielles d'eau potable et des eaux usées sont ensuite identifiées.

Par hypothèse, et pour ce cas d'étude, une inondation peut potentiellement affecter les éléments essentiels EE1, EE2, EE3 qui sont les stations de captage SCE-A/SCE-B/ SCE-C). Dans ce cas, la durée maximale de remise en service des éléments essentiels est estimée à 48 heures ($\text{RemiseMax}(\text{EE1 ou EE2 ou EE3}) = 48 \text{ heures}$).

Il n'y a aucune perturbation émise du fait qu'aucun élément essentiel n'est source de danger.

iv. Synthèse des chaînes essentielles

Douze chaînes essentielles sont constituées à partir de la liste des éléments essentiels du modèle TcAE restreint. Au total, cinquante-trois éléments essentiels sont identifiés dans le modèle restreint du TcAE (Tableau 13 ; Tableau 16). Ces ressources proviennent

essentiellement des activités de gestion de l'eau et de l'énergie (Figure 74). Les EE sont principalement situés au nord du département. Ils utilisent notamment comme support l'électricité provenant des postes sources A, B et C. Par hypothèse et pour ce cas d'étude, ces derniers peuvent subir un acte de malveillance comme perturbation externe issue de la catégorie menace intentionnelle. Le temps maximal de remise en service est de 48 heures ($\text{RemiseMax}(\text{EE26 ou EE28 ou EE30}) = 48 \text{ heures}$).

EE23	Regroupement des lignes et nœuds de connexion du réseau des télécommunications internet	EE39	Regroupement des canalisations et nœuds de connexion du réseau de gaz naturel
EE24	Centrale nucléaire	EE40	Centre hospitalier CH1
EE25	Regroupement des lignes et nœuds de connexion du réseau de transport d'électricité	EE41	Dépôt de produits essentiels
EE26	Poste source A (PSE-A)	EE42	Préfecture
EE27	Regroupement des lignes et nœuds de connexion du réseau de distribution d'électricité via le PSE-A	EE43	Mairie A
EE28	Poste source B (PSE-B)	EE44	Dépôt A de produits alimentaires de premières nécessités
EE29	Regroupement des lignes et nœuds d'interconnexion du réseau de distribution d'électricité via le PSE-B	EE45	Dépôt B de produits alimentaires de premières nécessités
EE30	Poste source C (PSE-C)	EE46	Aéroport
EE31	Regroupement des lignes et nœuds de connexion du réseau de distribution d'électricité via le PSE-C	EE47	Gare A
EE32	Dépôt pétrolier	EE48	Gare B
EE33	Station-service A (SSA)	EE49	Regroupement des voies et nœuds de connexion du transport ferroviaire
EE34	Station-service B (SSB)	EE50	Regroupement des voies et nœuds de connexion du transport autoroutier
EE35	Station-service C (SSC)	EE51	Autres stations-services du département
EE36	Station-service D (SSD)	EE52	Autres postes sources électriques du département
EE37	Station-service E (SSE)	EE53	Autres Mairies du Département
EE38	Regroupement des voies et nœuds de connexion du transport routier du département		

Tableau 16: Liste des éléments essentiels du TcAE Pilote

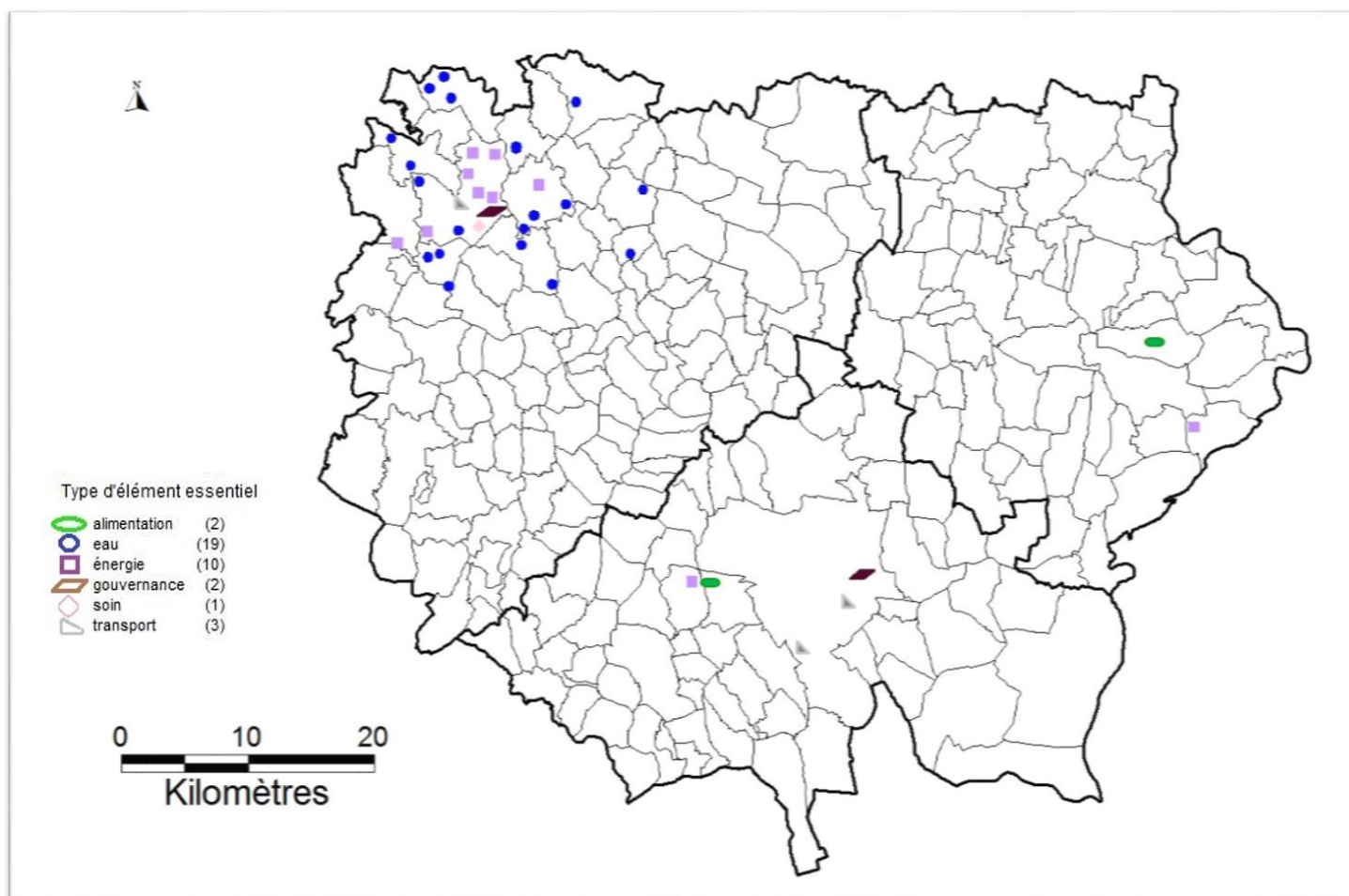


Figure 74 : Principaux éléments essentiels du pilote

II-3.2.2 Constitution des séquences fonctionnelles et groupes d'individus associés

L'identification des éléments essentiels et la typologie des fonctions permettent d'établir dans un second temps la liste des fonctions réalisées par les éléments essentiels. A l'aide des typologies des entrées, sorties et contraintes, les fonctions essentielles ou d'association sont identifiées et les entrées, contraintes et sorties des FE ou FA associées. Les séquences fonctionnelles sont ainsi reconstituées et la zone d'alimentation desservie cartographiée. La séquence fonctionnelle (SF1) associée à la mission de fourniture d'un service essentiel d'approvisionnement en eau potable est reconstituée. Les fonctions essentielles ou d'association sont réalisées par des composants de la CE1 « eau potable ».

i. Identification des fonctions essentielles ou d'association

Les fonctions « capter eau du milieu naturel », « traiter eau du milieu naturel », « transporter l'eau potable », « Stocker eau potable » et « Distribuer l'eau potable » sont réalisées par les éléments essentiels de CE1. Ces informations combinées avec la description des entrées, sorties et contraintes amènent à retenir huit fonctions essentielles ou d'association pour former la SF1. Les stations de captage et de production opèrent indépendamment entraînant la réalisation de fonction essentielle. Les réseaux de transport et de distribution étant regroupés comme deux éléments essentiels, les réservoirs d'eau potable réalisent une fonction d'association. L'ensemble des ressources (entrées, contraintes et sorties) de la SF1 sont présentées via des valeurs invariantes ou des paramètres (Tableau 17 ; Tableau 18 ; Tableau 19 ; Tableau 20).

Fonctions essentielles ou d'association (FE ou FA)		Sortie Si
FE1	Capter eau du milieu naturel (associée à EE1)	Captage eau du milieu naturel FE1
FE2	Capter eau du milieu naturel (associée à EE2)	Captage eau du milieu naturel FE2
FE3	Capter eau du milieu naturel (associée à EE3)	Captage eau du milieu naturel FE3
FE4	Traiter eau du milieu naturel (associée à EE4)	Traitement eau du milieu naturel FE4
FE5	Traiter eau du milieu naturel (associée à EE5)	Traitement eau du milieu naturel FE5
FE6	Traiter eau du milieu naturel (associée à EE6)	Traitement eau du milieu naturel FE6
FE7	Transporter eau potable (associé à EE7)	Transport eau potable
FA8	Stocker eau potable (associé à EE8)	Stockage eau potable
FE9	Distribuer eau potable (associé à EE9)	Distribution eau potable

Tableau 17 : Liste des fonctions essentielles ou d'association formant SF1

Le type de sortie Si est identifié permettant ainsi de connaître l'utilisation des règles de partage (symbole*) ou de priorités (symbole**) dans le cas d'une sortie indénombrables.

Type Sortie Si	Valeur Capacité maximale de sortie Si	Paramètre Demande en sortie Si
S1**	$C_{\max}(S1) = 750 \text{ m}^3/\text{h}$	$\text{DemandeSi}(S1, \text{FE1}, t)$
S2**	$C_{\max}(S2) = 500 \text{ m}^3/\text{h}$	$\text{DemandeSi}(S1, \text{FE2}, t)$
S3**	$C_{\max}(S3) = 750 \text{ m}^3/\text{h}$	$\text{DemandeSi}(S3, \text{FE3}, t)$
S4**	$C_{\max}(S4) = 750 \text{ m}^3/\text{h}$	$\text{DemandeSi}(S4, \text{FE4}, t)$
S5**	$C_{\max}(S5) = 500 \text{ m}^3/\text{h}$	$\text{DemandeSi}(S5, \text{FE5}, t)$
S6**	$C_{\max}(S6) = 750 \text{ m}^3/\text{h}$	$\text{DemandeSi}(S6, \text{FE6}, t)$
S7**	$C_{\max}(S7) = 2500 \text{ m}^3/\text{h}$	$\text{DemandeSi}(S7, \text{FE7}, t)$
S8**	$C_{\max}(S8) = 50\,000 \text{ m}^3$	$\text{DemandeSi}(S8, \text{FA8}, t)$
S9**	$C_{\max}(S9) = 2500 \text{ m}^3$	$\text{DemandeSi}(S9, \text{FE9}, t)$

Tableau 18 : Liste des sorties et mise en place de leurs paramètres de demande et de service

	Entrée	Paramètre de Demande en entrée Ej	Paramètre de Service en entrée Ej
E1	Eau du milieu naturel de FE1	$\text{DemandeEj}(E1, \text{FE1}, t)$	$\text{ServiceEj}(E1, \text{FE1}, t)$
E2	Eau du milieu naturel de FE2	$\text{DemandeEj}(E2, \text{FE2}, t)$	$\text{ServiceEj}((E2, \text{FE2}, t))$
E3	Eau du milieu naturel de FE3	$\text{DemandeEj}(E3, \text{FE3}, t)$	$\text{ServiceEj}(E3, \text{FE3}, t)$
E4	Captage eau du milieu naturel de FE1	$\text{DemandeEj}(E4, \text{FE4}, t)$	$\text{ServiceEj}(E4, \text{FE4}, t)$
E5	Captage eau du milieu naturel de FE2	$\text{DemandeEj}(E5, \text{FE5}, t)$	$\text{ServiceEj}(E5, \text{FE5}, t)$
E6	Captage eau du milieu naturel de FE3	$\text{DemandeEj}(E6, \text{FE6}, t)$	$\text{ServiceEj}(E6, \text{FE6}, t)$
E7	Traitement eau du milieu naturel FE4	$\text{DemandeEj}(E7, \text{FE7}, t)$	$\text{ServiceEj}(S7, \text{FE7}, t)$
E8	Traitement eau du milieu naturel FE5	$\text{DemandeEj}(E8, \text{FE7}, t)$	$\text{ServiceEj}(E8, \text{FE7}, t)$
E9	Traitement eau du milieu naturel FE6	$\text{DemandeEj}(E9, \text{FE7}, t)$	$\text{ServiceEj}(E9, \text{FE7}, t)$
E10	Transport eau potable FA7	$\text{DemandeEj}(E10, \text{FA8}, t)$	$\text{ServiceEj}(E10, \text{FA8}, t)$
E11	Stockage eau potable FA8	$\text{DemandeEj}(E11, \text{FE9}, t)$	$\text{ServiceEj}(E11, \text{FE9}, t)$

Tableau 19 : Liste des entrées utilisées par les FE ou FA de la SF1

	Contrainte	Paramètre de Demande en contrainte Cm	Paramètre de Service en contrainte Cm
C1	Transmission informations centre de pilotage réseau eau potable pour FE1	$DemandeCm(C1, FE1, t)$	$ServiceCm(C1, FE1, t)$
C2	Transmission informations centre de pilotage réseau eau potable pour FE2	$DemandeCm(C2, FE2, t)$	$ServiceCm((C2, FE2, t))$
C3	Transmission informations centre de pilotage réseau eau potable pour FE3	$DemandeCm(C3, FE3, t)$	$ServiceCm(C3, FE3, t)$
C4	Transmission informations centre de pilotage réseau eau potable pour FE4	$DemandeCm(C4, FE4, t)$	$ServiceCm(C4, FE4, t)$
C5	Transmission informations centre de pilotage réseau eau potable pour FE5	$DemandeCm(C5, FE5, t)$	$ServiceCm(C5, FE5, t)$
C6	Transmission informations centre de pilotage réseau eau potable pour FE6	$DemandeCm(C6, FE6, t)$	$ServiceCm(C6, FE6, t)$
C7	Transmission informations centre de pilotage réseau eau potable pour FE8	$DemandeCm(C7, FA8, t)$	$ServiceCm(C8, FA8, t)$

Tableau 20 : Liste des contraintes utilisées par les FE ou FA de SF1

ii. Constitution des séquences fonctionnelles

Sur cette base, la séquence fonctionnelle SF1 est constituée (Figure 75). Le service de la séquence fonctionnelle (= S9 « Distribution eau potable ») dessert la zone d'alimentation 1 (ZA1) comprise à l'intérieur de la zone de référence 1 (ZR1) (Figure 73). Par conséquent, le facteur de forme $ZA1/ZR1$ vaut 1 (ZA1 est complètement contenue dans ZR1) et les facteurs de forme $ZA1/ZR2$ et $ZA1/ZR3$ sont nuls (les intersections de ZA1 et ZR2 et ZA1 et ZR3 sont nulles) ($Forme(ZA1, ZR1)=1$ et $Forme(ZA1, ZR2) = Forme(ZA1, ZR3) = 0$).

iii. Répartition de la demande des usagers dans les séquences fonctionnelles

Deux usagers du service S9 « Distribution eau potable » sont dénombrés. Il s'agit des utilisateurs U1 ($NbreUtilisateursTheoriquesUp(U1) = 70\,000$) qui utilisent l'entrée E12 et du support Sup1 de CH1 « Distribution eau potable » (identifié à partir de la description du TcAE). Les expressions littérales de demande de l'ensemble des entrées et sorties de la SF1 sont établies en tenant compte de la demande des usagers (Figure 75). En effet, les coefficients de demande des trois branches de la séquence fonctionnelle SF1 permettent de partager la demande des usagers pour les entrées et sorties des fonctions essentielles « Capter eau du milieu naturel » et « Traiter eau du milieu naturel ». Il est considéré que la quantité d'eau potable délivrée correspond à la quantité d'eau prélevée dans le milieu naturel et donc le facteur de conversion est pris égal à 1. La fiche d'identité des utilisateurs U1 est également dressée :

- $NbreUtilisateursTheoriquesUp(U1) = 70\,000$;
- Paramètres de $DemandeEj(E12, U1, t)$ et $ServiceEj(E12, U1, t)$;
- $CoefImpact(E12) = 0,1$. Par hypothèse, 10% des utilisateurs impactés par une perte du

- service S9 « distribution eau potable » deviennent indisponibles ;
- L'entrée E12 influence la disponibilité des utilisateurs.

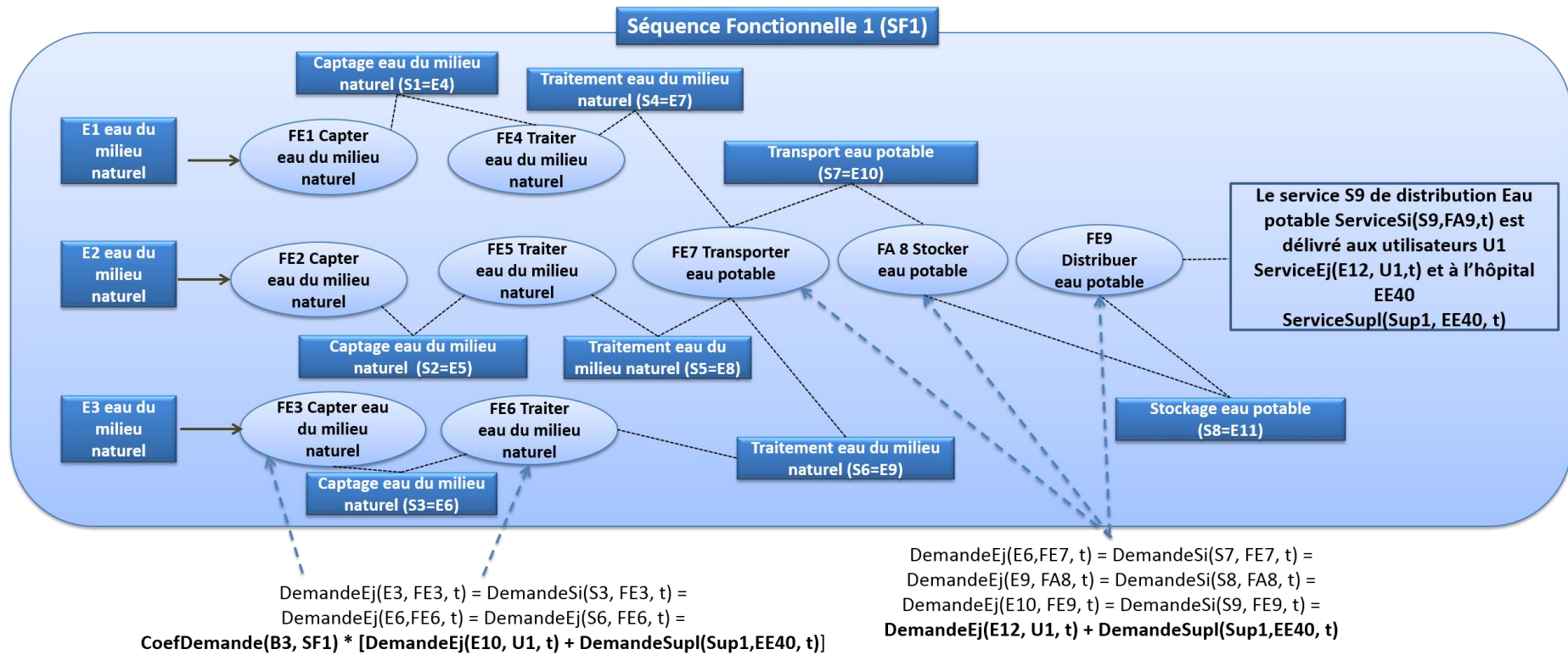


Figure 75 : Séquence fonctionnelle 1 du TcAE Pilote

iv. Synthèse des séquences fonctionnelles

Dix-neuf séquences fonctionnelles sont constituées à l'aide de la détermination des fonctions essentielles ou d'association. Le Tableau 21 récapitule les fonctions essentielles ou d'associations des autres séquences fonctionnelles. Plusieurs zones d'alimentation sur le département (une même séquence fonctionnelle peut desservir plusieurs ZA) et utilisateurs sont alors mis en évidence :

- Zone d'alimentation ZA0 (surface du département), dessert les services de déplacement des individus (routier, ferroviaire, aérien) des SF17, SF18 et SF19, les services de distribution du fioul domestique et carburéacteur (SF9 et SF10), les services de distribution des produits essentiels de santé (SF13), les services de distribution des produits alimentaires de première nécessité (SF15), et les services de transmission de l'information de la préfecture (SF17). Les utilisateurs U0 ($\text{NbUtilisateursTheoriquesUp}(U0) = 750\,000$) reçoivent tous les services des séquences sauf ceux de SF10 (carburéacteur) et SF17 (transmission informations préfecture).
- Zone d'alimentation ZA1 (au nord du département), dessert les services de distribution de l'eau potable (SF1), d'assainissement des eaux usées (SF2), des transmissions d'informations des centres de pilotage de l'eau potable (SF3) et des eaux usées (SF4). Les utilisateurs U1 reçoivent ces services sauf ceux des SF3 et SF4 ($\text{NbUtilisateursTheoriquesUp}(U1) = 70\,000$).
- Zone d'alimentation ZA2 (au nord du département, voir annexe 11), dessert le service de distribution d'électricité provenant du poste source A (SF5). Les utilisateurs U2 reçoivent ce service ($\text{NbUtilisateursTheoriquesUp}(U2) = 15\,000$) ;
- Zone d'alimentation ZA3 (au nord du département, voir annexe 11), dessert le service de distribution d'électricité provenant du poste source B (SF5). Les utilisateurs U3 reçoivent ce service ($\text{NbUtilisateursTheoriquesUp}(U3) = 15\,000$) ;
- Zone d'alimentation ZA4 (au nord du département, voir annexe 11), dessert le service de distribution d'électricité provenant du poste source C (SF5). Les utilisateurs U4 reçoivent ce service ($\text{NbUtilisateursTheoriquesUp}(U4) = 15\,000$) ;
- Zone d'alimentation ZA5 (ZA0 sans ZA2, ZA3 et ZA4), dessert le service de distribution d'électricité provenant des postes sources du département (sauf PSE A/ PSE B/ PSE C) (SF5). Les utilisateurs U5 reçoivent ce service ($\text{NbUtilisateursTheoriquesUp}(U5) = 705\,000$) ;
- Zone d'alimentation ZA6 (ZA0 sans l'étendue de la commune COMA), dessert les services de distribution des essences (SF7) et du gazole (SF8) provenant des stations-service du département (sauf (SSA/ SSB/ SSC/ SSD/ SSE) et des services de transmission des informations des autres Mairies (SF16). Les utilisateurs U6 reçoivent ces services ($\text{NbUtilisateursTheoriquesUp}(U6) = 710\,000$) ;
- Zone d'alimentation ZA7 (étendue de la commune COM A), dessert les services de distribution des essences (SF7) et du gazole (SF8) (via les SSA/SSB/SSC/SSD/SSE), les transmissions de l'information provenant de la mairie de la COM A (SF16). Les utilisateurs U7 reçoivent ces services ($\text{NbUtilisateursTheoriquesUp}(U7) = 40\,000$).

S2	FE10 Collecter les eaux usées	SF7	FE33 Transporter les essences vers les stations-service
	FE11 Assainir les eaux usées	SF8	FE34 Transporter le gazole vers les stations-service
SF3	FE12 Piloter le réseau d'eau potable	SF7	FA35 Distribuer les essences des SSA/SSB/SSC/SSD/SSE
	FE14 Transmettre les informations du centre de pilotage réseau d'eau potable	SF8	FA36 Distribuer le gazole des SSA/SSB/SSC/SSD/SSE
SF4	FE13 Piloter le réseau d'eaux usées	SF7	FA35 Distribuer les essences des stations-services (sauf SSA/SSB/SSC/SSD/SSE)
	FE15 Transmettre les informations de centre de pilotage réseau des eaux usées	SF8	FA36 Distribuer le gazole des stations-services (sauf SSA/SSB/SSC/SSD/SSE)
SF5	FE 16 Produire de l'électricité	SF9	FE37 Distribuer le fioul domestique
	FE 17 Transporter l'électricité HTB	SF10	FE38 Distribuer le carburacteur
	FE 18 Transformer et aiguiller l'électricité HTB PSE-A	SF11	FE39 Distribuer le gaz naturel
	FE 19 Distribuer l'électricité du PSE-A	SF12	FE40 Transmettre les informations du centre de pilotage du gaz naturel
	FE 20 Transformer et aiguiller l'électricité HTB PSE-B	SF13	FE41 Transporter les produits essentiels de santé
	FE21 Distribuer l'électricité du PSE-B		FE42 Stocker les produits essentiels de santé
	FE22 Transformer et aiguiller l'électricité HTB PSE-C		FE43 Distribuer les produits essentiels de santé
	FE23 Distribuer l'électricité du PSE C	SF14	FE44 Traiter les patients
	FE23 Distribuer l'électricité des postes sources du département (sauf PSE-A/ PSE-B/ PSE-C)	SF15	FA45 Transporter les produits de première nécessité
SF6	FE24 Transmettre les informations du centre de pilotage régional d'électricité		FA46 Stocker les produits alimentaires de première nécessité
SF7	FE25 transporter les essences		FA47 Distribuer les produits de première nécessité
SF8	FE26 transporter le gazole	SF16	FE48 Piloter le département en cas de crise
SF9	FE27 transporter le fioul lourd		FE49 Piloter la commune en cas de crise
SF10	FE28 transporter le carburacteur		FE 50 Transmettre les informations de la préfecture
SF7	FE29 Stocker les essences		FE51 Transmettre les informations de la mairie
SF8	FE30 Stocker le gazole	SF17	FA52 Déplacer les individus par le transport routier et autoroutier
SF9	FE31 Stocker le fioul domestique	SF18	FA53 Déplacer les individus par le transport ferroviaire
SF10	FE32 Stocker le carburacteur	SF19	FE54 Déplacer les individus par le transport aérien

Tableau 21: Liste des fonctions essentielles ou d'association du TcAE Pilote

II-3.2.3 Constitution de la population

La population se compose des individus actifs et « inactifs » localisée sur trois zones de référence distinctes. Ces individus sont à la fois des personnes subissant des perturbations majeures d'origine externe dans des zones d'impact et des utilisateurs des services dans des zones d'alimentation. Ces derniers ont déjà été identifiés tandis que les individus des zones de référence et les personnes des zones d'impact sont décrits dans la suite.

i. Individus des zones de référence

A partir de la description du TcAE, les valeurs d'individus des zones de références (IndividusTheoriques(ZRr)) et les paramètres de demande en individus actifs d'un élément essentiel pour une zone de référence donnée peuvent être déterminés.

Les valeurs d'individus (actifs et « inactifs ») des trois zones sont :

$$\text{IndividusTheoriques(ZR1)} = 200\,000$$

$$\text{IndividusTheoriques(ZR2)} = 150\,000$$

$$\text{IndividusTheoriques(ZR3)} = 300\,000$$

Par ailleurs, vingt-deux sorties d'individus actifs d'un élément essentiel pour les trois zones de référence sont dénombrées (Tableau 22).

S100	Individus actifs ZR1 centre de pilotage réseau eau	DemandeSi(S100,ZR1,t)
S101	Individus actifs ZR1 centre de pilotage réseau eaux	DemandeSi(S101,ZR1,t)
S102	Individus actifs ZR1-CH1	DemandeSi(S102,ZR1,t)
S103	Individus actifs ZR2 -CH1	DemandeSi(S103,ZR2,t)
S104	Individus actifs ZR3 -CH1	DemandeSi(S104,ZR3,t)
S105	Individus actifs ZR1-Mairie A	DemandeSi(S105,ZR1,t)
S106	Individus actifs ZR2-Mairie A	DemandeSi(S106,ZR3,t)
S107	Individus actifs ZR3 -Préfecture	DemandeSi(S107,ZR3,t)
S108	Individus actifs ZR1-Dépôt Alimentaire A	DemandeSi(S108,ZR1,t)
S109	Individus actifs ZR2-Dépôt Alimentaire A	DemandeSi(S109,ZR3,t)
S110	Individus actifs ZR3-Dépôt Alimentaire A	DemandeSi(S110,ZR3,t)
S111	Individus actifs ZR1-Dépôt Alimentaire B	DemandeSi(S111,ZR1,t)
S112	Individus actifs ZR2-Dépôt Alimentaire B	DemandeSi(S112,ZR3,t)
S113	Individus actifs ZR3-Dépôt Alimentaire B	DemandeSi(S113,ZR3,t)
S114	Individus actifs ZR3 -Dépôt Pétrolier	DemandeSi(S114,ZR3,t)
S115	Individus actifs ZR3-Produis essentiels de santé	DemandeSi(S115,ZR3,t)
S116	Individus actifs ZR3-Aéroport	DemandeSi(S116,ZR3,t)
S117	Individus actifs ZR3- Gara ville Préfecture	DemandeSi(S117,ZR3,t)
S118	Individus actifs ZR1 Gare commune A	DemandeSi(S118,ZR1,t)
S119	Individus actifs ZR1 Environnement TcAE	DemandeSi(S119,ZR1,t)
S120	Individus actifs ZR2 Environnement TcAE	DemandeSi(S120,ZR2,t)
S121	Individus actifs ZR3 Environnement TcAE	DemandeSi(S121,ZR3,t)

Tableau 22 : Individus actifs des éléments essentiels pour les zones de référence

ii. Personnes impactées

Par hypothèse, les personnes P1 de l'ensemble du département sont susceptibles d'être touchées par une perturbation externe « Pandémie ». La zone d'impact 1 (ZI1) est alors équivalente à la zone d'alimentation ZA0 et le nombre de personnes est égal à la population du TcAE ($NbreIndividusTheoriques(P1) = 750\,000$ individus).

II-3.2.4 Regroupement des ressources externes du TcAE (entrantes et sortantes)

Plusieurs ressources externes entrantes et sortantes du TcAE ont été mises en avant. Il convient de les regrouper respectivement en une unique entrée et sortie de l'environnement du TcAE. Par exemple, la ressource « eau du milieu naturel » correspond aux entrées E1, E2 et E3, respectivement des fonctions essentielles FE1, FE2 et FE3. L'entrée notée E100 regroupe alors E1, E2 et E3. Les paramètres de services d'entrée sont également associés (Tableau 23).

Ressources externes entrantes		Paramètre service des ressources externes entrantes
E100	Eau du milieu naturel	ServiceEj(E100, EnvironnementTcAE, t)
E101	Electricité HTB	ServiceEj(E101, EnvironnementTcAE, t)
E102	Gaz naturel	ServiceEj(E102, EnvironnementTcAE, t)
E103	Essences	ServiceEj(E103, EnvironnementTcAE, t)
E104	Gazole	ServiceEj(E104, EnvironnementTcAE, t)
E105	Fioul domestique	ServiceEj(E105, EnvironnementTcAE, t)
E106	Carburéacteur	ServiceEj(E106, EnvironnementTcAE, t)
E107	Informations centre de pilotage réseau électricité	ServiceEj(E107, EnvironnementTcAE, t)
E108	Informations centre de pilotage réseau gaz naturel	ServiceEj(E108, EnvironnementTcAE, t)
E109	Produits essentiels de santé	ServiceEj(E109, EnvironnementTcAE, t)
E110	Produits alimentaires de première nécessité	ServiceEj(E110, EnvironnementTcAE, t)
E111	Individus Extérieur Transport routier	ServiceEj(E111, EnvironnementTcAE, t)
E112	Individus Extérieur Transport ferroviaire	ServiceEj(E112, EnvironnementTcAE, t)
E113	Individus Extérieur Transport aérien	ServiceEj(E113, EnvironnementTcAE, t)

Tableau 23 : Liste des ressources entrantes externes du TcAE

Par ailleurs, les mêmes ressources externes sortantes sont également regroupées. Dans notre cas d'application, les ressources externes sortantes sont toutes distinctes. Six

ressources sont dénombrées et les paramètres de demande et service sont associées (Tableau 24).

Ressources externes sortantes		Paramètre Demande et Service des ressources externes sortantes	
S100	Transport Electricité HTB	DemandeSi(S100, EnvironnementTcAE, t)	ServiceSi(S100, EnvironnementTcAE, t)
S101	Distribution produits essentiels de santé	DemandeSI(S101, EnvironnementTcAE, t)	ServiceSI(S101, EnvironnementTcAE, t)
S102	Transmission informations Préfecture	DemandeSi(S102, EnvironnementTcAE, t)	ServiceSi(S102, EnvironnementTcAE, t)
S103	Déplacement des individus par le transport routier et autoroutier	DemandeSi(S103, EnvironnementTcAE, t)	ServiceSi(S103, EnvironnementTcAE, t)
S104	Déplacement des individus par le transport ferroviaire	DemandeSi(S104, EnvironnementTcAE, t)	ServiceSi(S104, EnvironnementTcAE, t)
S105	Déplacement des individus par le transport aérien	DemandeSi(S105, EnvironnementTcAE, t)	ServiceSi(S105, EnvironnementTcAE, t)

Tableau 24 : Liste des ressources externes sortantes et paramètres de demande et service

II-3.2.5 Assemblage des informations obtenues

L'ensemble des informations obtenues peut être synthétisé à partir des formalismes EE/FE ou FA et Utilisateurs (U). Les valeurs invariantes et paramètres sont insérés aux formalismes.

Pour le formalisme élément essentiel/fonction essentielle, un exemple est donné pour le couple élément essentiel EE1 « Station de captage » et fonction essentielle FE1 « Capter eau du milieu naturel » (Figure 76). La fonction essentielle utilise en entrée E1 « eau du milieu naturel » et la contrainte C1 « Transmission d'information centre de pilotage du réseau d'eau potable » et délivre le service S1 « captage d'eau du milieu naturel ». L'élément essentiel EE1 utilise le support Sup2 « distribution d'électricité ZA1 ».

Les utilisateurs 1 (U1) recevant les services de E12 « Distribution d'eau potable », E13 « assainissement des eaux usées » et E63 « traitement des individus » est un exemple d'illustration du formalisme U. Les vingt et une sorties d'individus actifs des EE pour les différentes zones de référence sont identifiées (Figure 77).

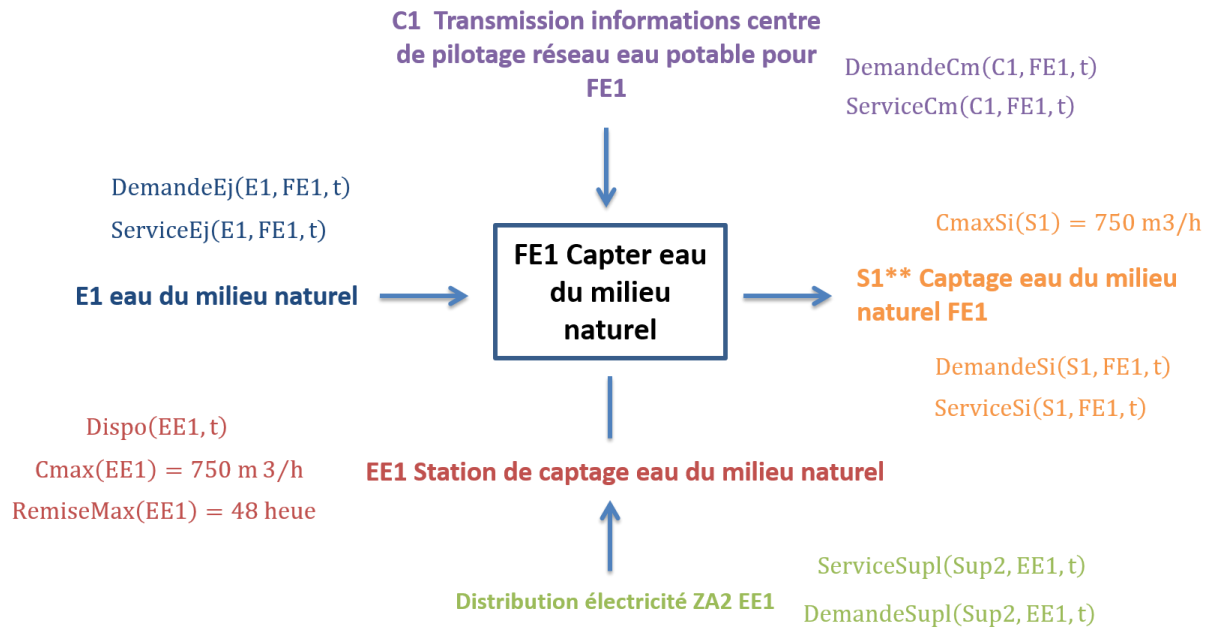


Figure 76 : Formalisme élément essentiel/fonction EE1/FE1

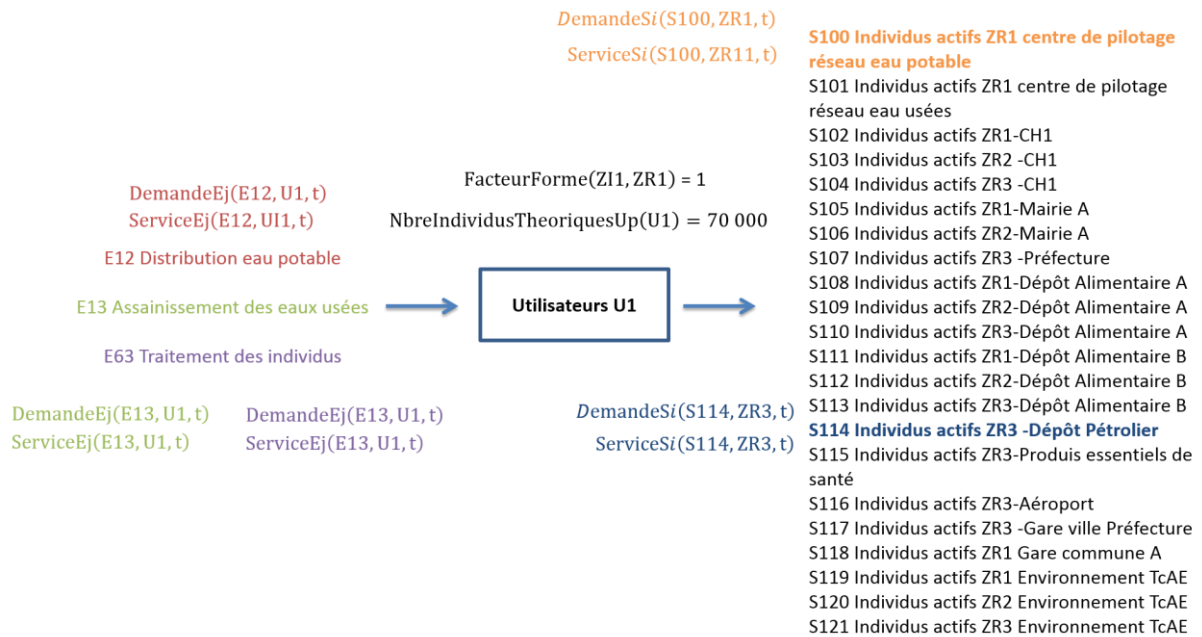


Figure 77 : Formalisme Utilisateurs (U) appliqué à U1

II-3.3. Elaboration et configuration des scénarios de propagation du TcAE Pilote

II-3.3.1 Liste des scénarios courts

La construction du modèle TcAE Pilote dans un environnement à risque et les typologies de parcours permettent de lister les cinq cent soixante-quinze scénarios courts. Dans cette liste, on distingue :

- Sept scénarios courts dus à une perturbation externe sur les éléments essentiels et un scénario court lié à un flux de danger sur un élément essentiel (parcours 1) ;
- Quarante-sept scénarios dus à l'utilisation de supports par les éléments essentiels (parcours 2) ;
- Seize scénarios courts dus à l'utilisation de contraintes par les fonctions essentielles ou d'association (parcours 3) ;
- Cinquante-trois scénarios courts dus à une perte d'activité des éléments essentiels (parcours 4) ;
- Soixante-sept scénarios courts liés à l'utilisation d'une entrée par les fonctions essentielles ou d'association (parcours 5) ;
- Vingt-deux scénarios courts liés à une perturbation externe sur les personnes influant sur leur intégrité (parcours 6) ;
- Trois cent soixante-trois scénarios courts utilisant une entrée permettant la disponibilité ou mobilité des utilisateurs (parcours 7).

Le Tableau 25 reprend certains scénarios courts issus des sept types de parcours.

II-3.3.2 Configuration des scénarios courts du TcAE Pilote

L'ensemble des scénarios courts du TcAE Pilote ont été configurés afin de tester de nombreux scénarios de propagation durant la simulation.

i. Illustration des paramètres de deux scénarios courts avec élément essentiel (parcours 1 et 2)

Les types de parcours (respectivement 1 et 2) sont illustrés à l'aide de deux scénarios courts (respectivement SC1 et SC13) distincts (Figure 78 : Exemple des paramètres d'évaluation des scénarios courts comportant des éléments essentiels). Le SC1 estime l'intégrité de l'élément essentiel EE32 « dépôt pétrolier » suite à un attentat. La perte d'activité est évaluée en fonction de l'intégrité et de la disponibilité de l'élément essentiel EE32. D'autre part, selon la valeur d'intégrité du dépôt pétrolier suite à cette perturbation majeure, un flux de danger peut se produire.

Le SC13 illustre la distribution d'électricité Sup27 utilisée par la station de captage EE5. La valeur d'opérabilité de EE5 Op(sup27 distribution électricité ZA2, station production eau potable EES, t) est calculée sur la base de la valeur d'autonomie du support et de sa valeur d'incapacité estimée en fonction des valeurs de service et de demande. Celle-ci permet d'obtenir le pourcentage de perte d'activité de l'EE5 Epj(sup27 distribution d'électricité ZA2, station de production eau potable EE5,t).

Scénario courts via les sept enchaînements possibles			
Scénario court 1	Attentat	EE32 Dépôt Pétrolier	Perte d'activité EE32 Dépôt Pétrolier + Flux de danger
Scénario court 526	Flux de danger	EE44 Dépôt Alimentaire A	Perte d'activité EE44 Dépôt Alimentaire A
Scénario court 13	Sup27 Distribution électricité EE5 ZA2	EE5 Station de Production d'eau potable	Perte d'activité EE5 Station de Production d'eau potable
Scénario court 62	Perte d'activité EE5 Station de Production d'eau potable	FE5 Traiter eau du milieu naturel	Sortie S5 Traitement eau du milieu naturel FE5
Scénario court 103	C5 Transmission informations centre de pilotage réseau eau potable	FE5 Traiter eau du milieu naturel	Sortie S5 Traitement eau du milieu naturel FE5
Scénario court 125	E3 Captage eau du milieu naturel FE2	FE5 Traiter eau du milieu naturel	Sortie S5 Traitement eau du milieu naturel FE5
Scénario court 128	E6 Traitement eau du milieu naturel FE5	FE7 Transporter eau potable	Sortie S7 Transport eau potable
Scénario court 529	Pandémie	Intégrité P0	S102 Individus actifs CH1 – ZR1
Scénario court 300	E45 Distribution du gazole	Disponibilité U7	S102 Individus actifs CH1 – ZR1
Scénario court 482	E58 Déplacement des individus par le réseau routier	Mobilité U0	S102 Individus actifs CH1 – ZR1
Scénario court 496	E58 Déplacement des individus par le réseau routier	Mobilité U0	S116 Individus actifs Aéroport ZR3
Scénario court 43	Sup22 Individus actifs Aéroport ZR3	EE46 Aéroport	Perte d'activité EE46 Aéroport

En vert, un lien géographique
En orange, un lien individu

En rouge, un lien fonctionnel
En noir, un lien entre éléments essentiels et fonctions

Tableau 25 : Liste partielle des scénarios courts du TcAE Pilote

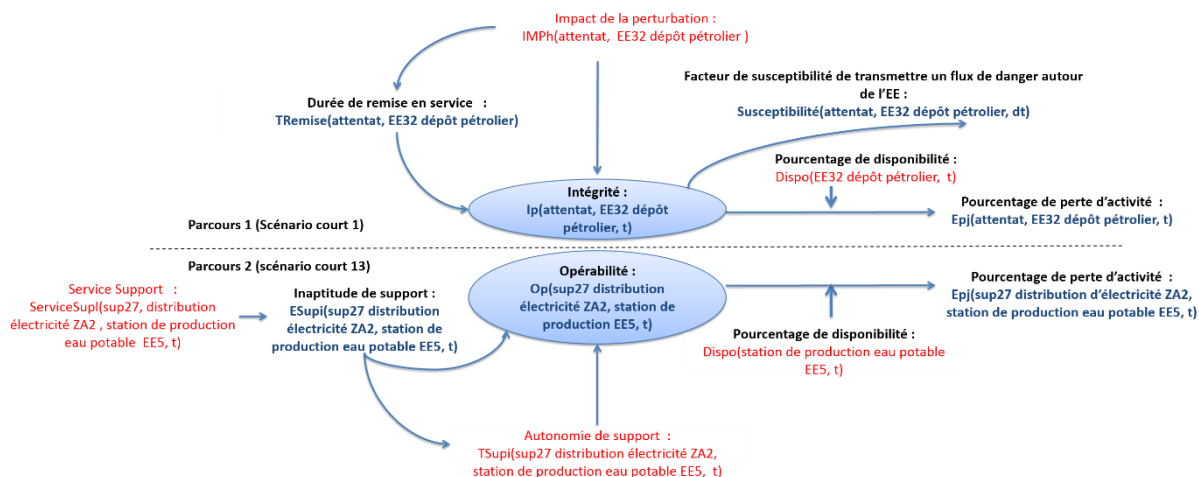


Figure 78 : Exemple des paramètres d'évaluation des scénarios courts comportant des éléments essentiels

Les valeurs marquées en rouge sont les paramètres d'entrée des scénarios courts SC1 et SC13. Il s'agit de la valeur d'impact de la perturbation attentat dans le cas du parcours 1 et de la valeur de support sup27 « Distribution électricité EE5 ZA2 » dans le second cas. L'autonomie de support à l'instant $t=0$ et la disponibilité des éléments essentiels EE32 et EE5 sont également des paramètres initiaux.

ii. Illustration de trois scénarios courts avec fonction essentielle ou d'association (Parcours 3, 4 et 5)

Les scénarios courts SC62, SC103 et SC125 illustrent les parcours 1 à 3 avec une même fonction essentielle (Figure 79). L'état de la fonction essentielle FE5 « traiter eau du milieu naturel » dépend des paramètres d'entrée correspondant soit à la valeur d'une contrainte (scénario court 103), soit à la valeur de perte d'activité de l'élément essentiel (scénario court 62) soit la valeur d'entrée (scénario court 125). Les stocks de sortie S5 « traitement eau du milieu naturel FE5 » sont alors estimés.

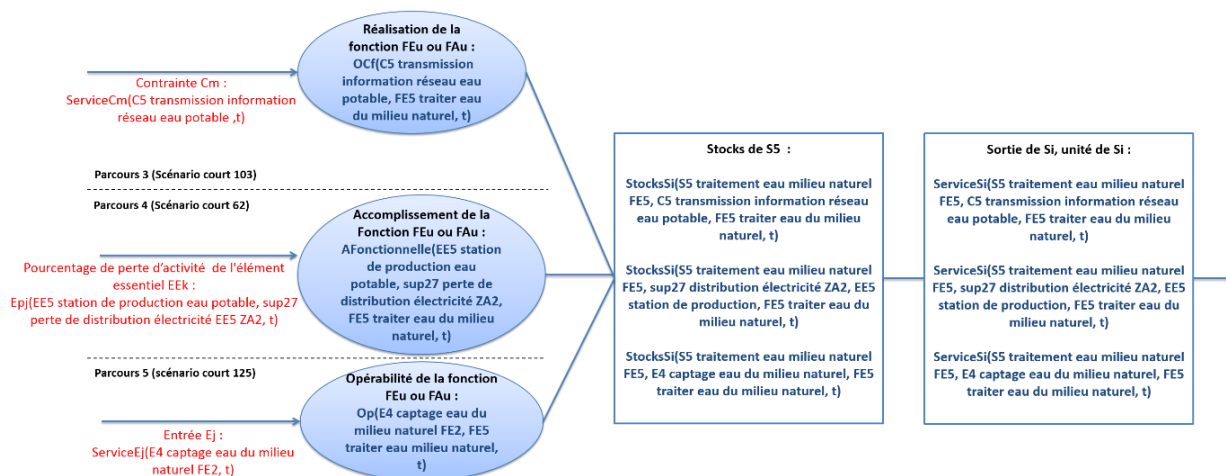


Figure 79 : Exemple des paramètres d'évaluation des scénarios courts avec des fonctions essentielles ou d'association

iii. Illustration des scénarios courts avec les Utilisateurs et les Personnes (parcours 6 et 7)

Deux scénarios courts sont illustrés tenant compte des groupes d'individus dans les parcours 6 et 7 (Figure 80). L'intégrité de P0 et la disponibilité de U7 sont étudiées respectivement selon l'impact d'une perturbation externe « pandémie » et la valeur d'entrée E45 « Distribution de gazole ». Il est alors possible d'estimer le nombre d'individus actifs de l'élément essentiel EE40 « Centre Hospitalier CH1 » pour la zone de référence 1.

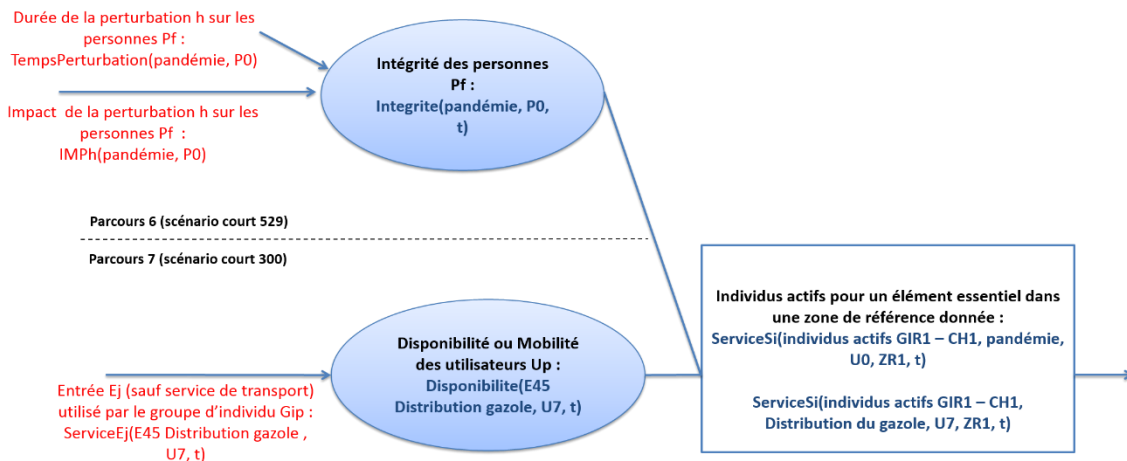


Figure 80 : Illustration des paramètres des scénarios courts avec les utilisateurs et les personnes

II-3.3.3 Matrice des liens

A partir de la liste des scénarios courts et en ajoutant les ressources externes entrantes et sortantes de l'environnement du TcAE, la matrice des liens est construite. Le nombre de lignes et de colonnes étant trop important, seul un extrait de la matrice des liens est représenté ici (Figure 81). Toutefois, plusieurs commentaires peuvent être établis concernant les différents types de liens que l'on peut y retrouver.

Un lien géographique (en vert dans Tableau 25) existe entre les scénarios courts SC11 et SC526 du fait qu'un flux de danger émis par l'élément essentiel EE32 « Dépôt Pétrolier » peut impacter l'élément essentiel EE44 « Dépôt alimentaire » car le rayon de danger de EE 32 est supérieur à la distance entre les deux éléments essentiels. D'autre part, un lien entre un élément essentiel et la fonction essentielle qu'il réalise est également identifié entre les scénarios courts SC13 et SC62 (en noir dans Tableau 25). La perte d'activité de l'élément essentiel EE5 « Station de production d'eau potable » dépendant à l'origine de l'utilisation du support Sup27 « Distribution d'électricité EE5 ZA2 » influence la fonction FE5 « traiter eau du milieu naturel » et sa sortie S5 « traitement eau du milieu naturel ». Cette sortie est une des entrées utilisées par la fonction FE7 « transporter eau potable » (scénario court SC128 ; lien rouge dans Tableau 25). Par ailleurs, le scénario court SC496 est lié au scénario court SC43 par un lien individu (en orange dans Tableau 25). Le nombre d'individus voulant se déplacer par voie routière influence la mobilité des utilisateurs U0 (individus du département) et ainsi le nombre d'individus actifs de l'aéroport EE46 pour la zone de référence ZR3.

	SC1	SC13	SC43	SC62	SC125	SC128	SC265	SC496	SC526	Total scénarios ou ressources influents
SC1									1	1
SC13				1						1
SC43										0
SC62										0
SC125						1				2
SC134										0
SC265										0
SC496			1							1
SC526										0
Total scénarios ou ressources influents	0	0	1	1	0	1	1	0	0	12

Figure 81 : Extrait de la matrice des liens TcAE Pilote

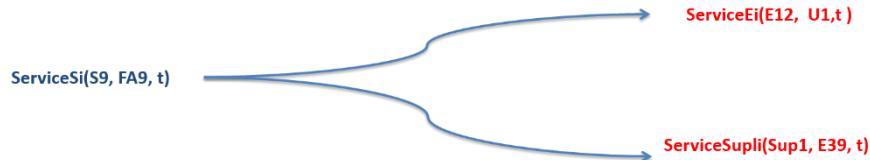
D'autre part, il est possible de tirer d'autres commentaires de la lecture de la matrice des liens TcAE Pilote :

- Les scénarios courts comportant les sorties des dernières fonctions des séquences fonctionnelles peuvent influencer la disponibilité ou mobilité des groupes d'individus. Vingt-deux scénarios courts sont alors dépendants des sorties puisqu'il existe dix-neuf supports distincts d'individus actifs pour les éléments essentiels localisés dans les trois zones de référence ainsi que trois possibilités de ressources externes sortantes d'individus du TcAE ;
- Le scénario court possédant la sortie S19 « Distribution de l'électricité sur ZA2 » influence vingt-six scénarios courts car son service est utilisé comme support par les éléments essentiels localisés dans cette zone d'alimentation ZA2 et par les utilisateurs U2 ;

II-3.3.4 Liens entre les scénarios courts et les ressources externes du TcAE

La configuration des scénarios de propagation se termine par la configuration des liens entre les scénarios courts et les ressources externes entrantes et sortantes du TcAE. L'essentiel de cette phase de travail repose sur la mise en place des règles de priorité et de partage des sorties des fonctions essentielles ou d'association ainsi que des ressources externes entrantes dans le TcAE.

Par exemple, la sortie S9 « Distribution eau potable » est livrée prioritairement comme support Sup1 à l'élément essentiel EE39 « centre hospitalier CH1 » puis à l'entrée E12 des utilisateurs U1 (Figure 82).

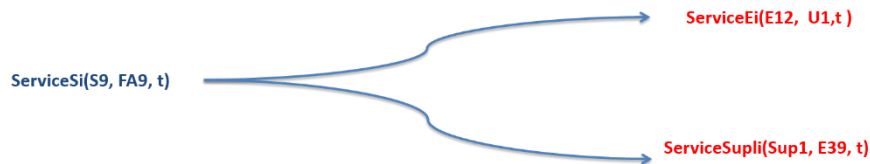


Règles de priorité, avec sup1 prioritaire par rapport à E12 :

Si $\text{ServiceSi}(S9, FA9, t) = \text{DemandeEj}(E12, U1,t) + \text{DemandeSupl}(\text{Sup1}, EE39, t)$ alors
 $\text{ServiceSupl}(\text{Sup1}, EE39, t) = \text{DemandeSupl}(\text{Sup3}, FA9, t)$ et $\text{ServiceEj}(E12, U1,t) = \text{DemandeEj}(E12, U1,t)$
 Sinon
 Si $\text{ServiceSi}(S9, FA9, t) > \text{DemandeSupl}(\text{Sup1}, EE39, t)$
 $\text{ServiceSupl}(\text{Sup1}, EE39, t) = \text{DemandeSupl}(\text{Sup1}, EE39, t)$ et $\text{ServiceEj}(E12, U1,t) = \text{ServiceSi}(S9, FA9,t) - \text{DemandeSupl}(\text{Sup1}, EE39, t)$
 Sinon
 $\text{ServiceSupl}(\text{Sup1}, EE39, t) = \text{ServiceSi}(S9, FA9, t)$ et $\text{ServiceEj}(E12, U1,t) = 0$

Figure 82 : Illustration de la règle de priorité sortie S9 "Distribution eau potable"

La règle de partage peut s'illustrer avec la sortie S30 « Stockage du gazole du dépôt pétrolier » qui est utilisée comme entrée E43 par la fonction d'association FA34 « Distribuer le gazole via SSA/SSB/SSC/SSD/SSE » et comme entrée E44 la fonction d'association FA34 « Distribuer le gazole par les autres stations-service » (Figure 83).



Règles de priorité, avec sup1 prioritaire par rapport à E12 :

Si $\text{ServiceSi}(S9, FA9, t) = \text{DemandeEj}(E12, U1,t) + \text{DemandeSupl}(\text{Sup1}, EE39, t)$ alors
 $\text{ServiceSupl}(\text{Sup1}, EE39, t) = \text{DemandeSupl}(\text{Sup3}, FA9, t)$ et $\text{ServiceEj}(E12, U1,t) = \text{DemandeEj}(E12, U1,t)$
 Sinon
 Si $\text{ServiceSi}(S9, FA9, t) > \text{DemandeSupl}(\text{Sup1}, EE39, t)$
 $\text{ServiceSupl}(\text{Sup1}, EE39, t) = \text{DemandeSupl}(\text{Sup1}, EE39, t)$ et $\text{ServiceEj}(E12, U1,t) = \text{ServiceSi}(S9, FA9,t) - \text{DemandeSupl}(\text{Sup1}, EE39, t)$
 Sinon
 $\text{ServiceSupl}(\text{Sup1}, EE39, t) = \text{ServiceSi}(S9, FA9, t)$ et $\text{ServiceEj}(E12, U1,t) = 0$

Figure 83 : Illustration règle de partage de la sortie S31 « Transport du gazole du dépôt pétrolier »

II-3.4. Evaluation de la résilience systémique, TcAE Pilote

Un acte de malveillance est une perturbation majeure pour les trois postes sources électriques PSE-A, PSE-B et PSE-C. Le but de cette ultime étape est d'étudier cette perturbation majeure impactant le TcAE sur ces trois éléments essentiels.

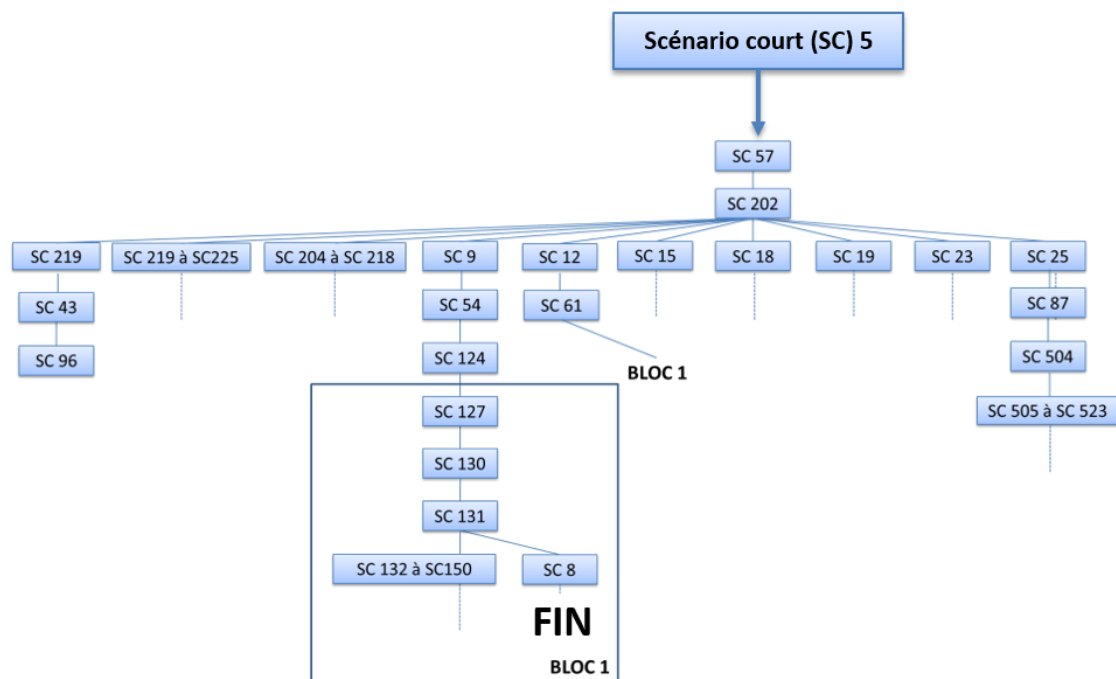
II-3.4.1 Description des scénarios longs

Trois scénarios longs (respectivement SL1, SL2, SL3) sont construits à partir la perturbation majeure « acte de malveillance » et la matrice des liens. Des extraits des scénarios longs SL1, SL2 et SL3 sont représentés Figure 84 et Figure 85 (une partie des scénarios courts sont détaillés Tableau 26). Ils débutent par les scénarios courts SC5, SC6 et SC7 contiennent l'évènement initial « acte de malveillance ».

Les seconds scénarios courts (SC57, SC58 et SC59) qui apparaissent sur les différents scénarios longs correspondent au lien élément essentiel « poste source » /fonction essentielle « Transformer et aiguiser l'électricité HTB ». Les fonctions essentielles « Distribuer l'électricité » interviennent ensuite via les scénarios courts SC202/ SC203/ SC203 et permettent de relier les sorties aux supports des éléments essentiels et entrée des utilisateurs localisés dans les zones d'alimentation ZA2, ZA3 et ZA4. Il s'agit des liens indirects de premier ordre par rapport à la perturbation majeure « acte de malveillance ». L'ensemble des éléments essentiels de la chaîne essentielle « Fourniture d'eau potable » et les fonctions essentielles ou d'association associées apparaissent (scénarios Courts SC9/SC12/SC54/SC61/SC124/SC127/SC130/SC131 dans le scénario long SL1, SC10/SC13/SC52/SC62/SC125/SC128/SC130/SC131 pour SL2 et SC11/ SC14/ SC53/SC63/SC126/SC129/SC130/SC131 pour SL3). Ces scénarios courts forment deux ramifications pour chaque scénario long en raison de l'utilisation de la sortie de « Distribution d'électricité » par deux éléments essentiels de la chaîne essentielle. Par exemple, les stations de captage A et de production A utilisent en support la sortie S19 « Distribution électricité PSE-A ».

D'autre part, la mairie de la commune A (scénario court SC25 dans scénario long SL1), la station d'épuration (scénario court SC15 dans SL1), l'hôpital CH1 (scénario court SC23 dans SL1 et SC24 dans SL2), les centres de pilotage du réseau d'eau potable et des eaux usées (respectivement SC16 dans SL2 et SC17 dans SL3) et les stations-services A/B/C/D/E (scénarios courts SC18/SC19 dans SL1, SC20/SC21 dans SL2 et SC22 dans SL3) utilisent les sorties de « Distribution électricité ». D'autre part, la perturbation majeure peut se propager géographiquement par le nombre d'individus actifs domiciliés dans les zones d'alimentation de distribution de l'électricité mais travaillant pour des éléments essentiels situés à l'extérieur des ZA2, ZA3 et ZA4 (par exemple SC203 à SC225 dans le scénario long 1). C'est le cas des individus actifs de l'aéroport domiciliés dans la zone de référence 1 et utilisant l'entrée E25 « Distribution électricité PSE-A ».

Par ailleurs, les liens indirects possibles de second ordre peuvent également être mis en avant. Par exemple, les composants de la chaîne de fourniture d'eau potable utilisant tous de l'électricité, le centre hospitalier CH1 (EE39) et les utilisateurs U1 apparaissent car ils utilisent le service S9 « Distribution eau potable » (scénario court SC8 et SC132 à SC150). La ramification contenant le centre hospitalier s'interrompt ensuite car trois séquences fonctionnelles sont touchées.



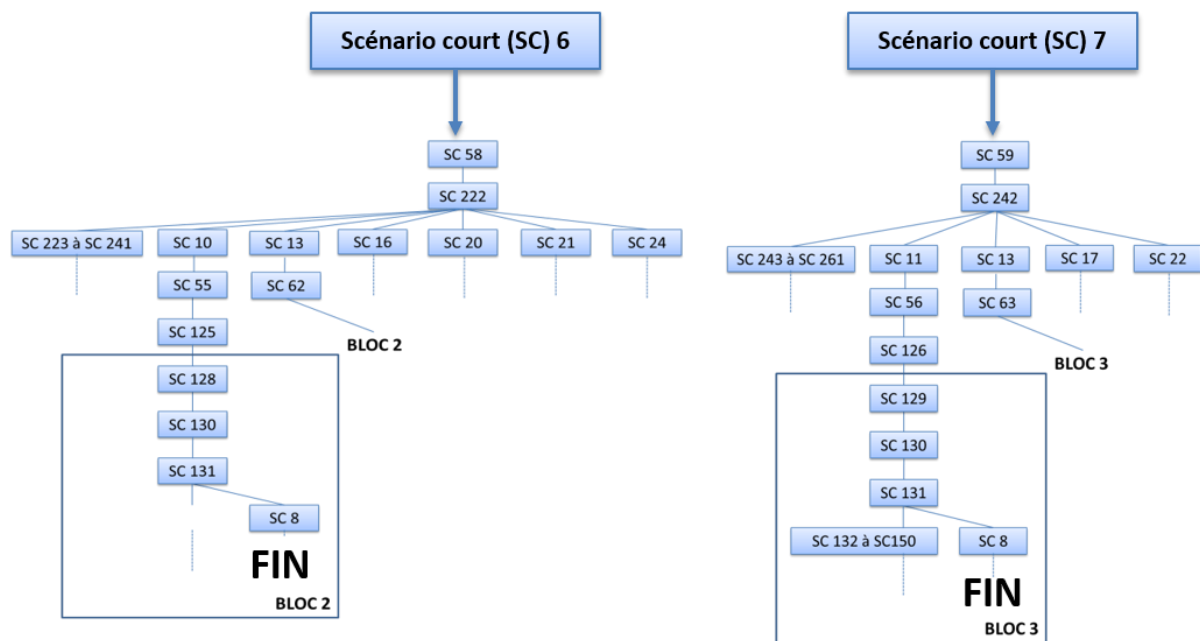
Ramification R1.1 : SC5/SC57/SC202/SC9/SC54/SC124/SC127/SC130/SC131/SC8

Ramification R1.2 : SC5/SC57/SC202/SC12/SC61/SC124/SC127/SC130/SC131/SC8

Figure 84 : Extrait du scénario long 1

Scénario Court (SC)			
SC5	Acte de malveillance	Intégrité de EE26	Perte d'activité EE26
SC 57	Perte activité EE26 Poste source A	Accomplissement de FE18 Transformer et aiguiller l'électricité HTB PSE-A	S18 Transformation et aiguillage électricité HTB ZA1
SC 202	E24 Transformation et aiguillage électricité HTB PSE-A	Opérabilité de FE19 Distribuer l'électricité PSE-A	S19 Distribution électricité PSE-A
SC 219	E25 Distribution électricité PSE-A	Disponibilité U2	S116 Individus actifs GIR3-Aéroport
SC 43	Individus actifs GIR3-Aéroport	Opérabilité de EE46 Aéroport	Perte d'activité EE46 Aéroport
SC 96	Perte d'activité EE46 Aéroport	Accomplissement de FE54 Déplacer les individus par voie aérienne	S54 Déplacement des individus par voies aérienne
SC 9	Sup2 Distribution électricité PSE-A	Opérabilité EE1 Station de captage	Perte d'activité EE1 Station de captage
SC 54	Perte d'activité EE1 Station de captage	Accomplissement FE1 Capter eau du milieu naturel	S1 Captage eau du milieu naturel FE1
SC 124	E2 Captage eau du milieu naturel FE1	Opérabilité FE4 Traiter eau du milieu naturel	S4 Traitement eau du milieu naturel FE4
SC 127	E5 Traitement eau du milieu naturel FE4	Opérabilité FA7 Transporter eau potable	S7 Transport eau potable
SC 130	E8 Transport eau potable	Opérabilité FA8 Stocker eau potable	S8 Stockage eau potable
SC 131	E9 Stockage eau potable	Opérabilité FA9 Distribuer eau potable	S9 Distribution eau potable
SC 132	E10 Distribution eau potable	Disponibilité U1	Individus actifs GIR1 centre de pilotage réseau eau potable
SC 8	E10 Distribution eau potable	Opérabilité EE40 Centre Hospitalier CH1	Perte d'activité EE40 Centre Hospitalier CH1
SC 12	Sup26 Distribution électricité PSE-A	Opérabilité EE4 Station de Production d'eau potable	Perte d'activité EE4 Station de Production d'eau potable
SC 61	Perte d'activité EE4 Station de Production d'eau potable	Accomplissement FE4 Traiter eau du milieu naturel	S4 Traitement eau du milieu naturel FE4

Tableau 26 : Extrait de la liste des scénarios courts de SL1



Ramification R2.1 : SC6/SC558/SC222/SC10/SC55/SC125/SC128/SC130/SC131/SC8

Ramification R2.2 : SC6/SC558/SC222/SC13/SC125/SC128/SC130/SC131/SC8

Ramification R3.1 : SC7/SC59/SC242/SC11/SC56/SC126/SC129/SC130/SC131/SC8

Ramification R3.2 : SC7/SC59/SC242/SC13/SC63/SC126/SC129/SC130/SC131/SC8

Figure 85 : Extrait des scénarios longs 2 (à gauche) et 3 (à droite)

II-3.4.2 Paramètres initiaux des scénarios

L'étude va porter sur une simulation unique des trois scénarios de propagation. La valeur d'impact de la perturbation majeure est de 1 (= valeur maximale).

Pour cela, les deux premières données à déterminer sont la durée et le pas de temps de simulation. La simulation des trois scénarios longs est programmée pour une durée de 48h. Cette valeur correspond à la durée maximale de remise en service des postes sources A, B et C. Le pas de temps de simulation choisi est une heure.

D'autre part, plusieurs valeurs de paramètres sont à indiquer avant le démarrage de la simulation. Il s'agit tout d'abord de la valeur d'impact de la perturbation externe « acte de malveillance ». Cette valeur est maximale et égale à 1. La disponibilité des éléments essentiels, le temps d'autonomie des ressources alternatives en support des éléments essentiels, les stocks de sortie Si et la demande en ressources des usagers sont également des valeurs à saisir. Dans le cas de cette application, il sera considéré que :

- Tous les éléments essentiels sont disponibles à 100% ;
- L'hôpital CH1, la mairie de la commune A, les centres de pilotage du réseau eau potable et eaux usées ainsi que les stations-service SSA/SSB/SSC/SSD/SSE possèdent des groupes électrogènes permettant de disposer de 48 heures d'autonomie en cas d'interruption électrique alors que la station d'épuration possède 2 heures d'autonomie. Les autres éléments essentiels ont une durée d'autonomie nulle ;
- Les stocks de sortie S4/S5/S6 à l'instant $t=t(\text{initial})$ des fonctions essentielles FE4 et FE6 des stations de production d'eau potable sont de 200 m³ et pour FE5, le stock

S5 vaut 100m^3 . La fonction d'association FA8 « Stocker eau potable » possède un stock de sortie S8 à l'instant initial de 3900 m^3 . Les fonctions d'association FA35 et FA36 des stations-services délivrant du gazole et des essences ont un stock de ces produits d'une valeur de 1000 m^3 . Les valeurs de stock des sorties des fonctions FE40 « Stocker les produits essentiels de santé » et FA45 « Stocker les produits alimentaires de première nécessité » sont respectivement de $100\ 000$ et $50\ 000$ unités (qui pourraient être des vaccins et des bouteilles d'eau potable). Toutes les autres valeurs de stocks à l'instant initial sont nulles ;

- Les services de sorties Si des scénarios à l'instant initial sont égales aux demandes constantes de sortie Si lors de la simulation ;

II-3.4.3 Etat initial du TcAE pilote

Les valeurs de demande des usagers sont à établir pour l'ensemble des séquences fonctionnelles.

Pour les utilisateurs U2/U3/U4, les demandes de distribution d'électricité sont 1 car cette ressource est appréhendée de manière binaire. De façon identique, les demandes d'informations des différentes fonctions essentielles ou d'association (exemple : C1 « Transmission informations centre de pilotage réseau eau potable FE1 ») via les contraintes sont fixés à 1.

La demande constante en eau potable du centre hospitalier CH1 est de $50\text{ m}^3/\text{h}$ tandis que pour les utilisateurs U1 la valeur est de $650\text{ m}^3/\text{h}$. Pour les utilisateurs U7 (utilisateurs de la commune COM A), la demande des essences et du gazole est de $3000\text{ m}^3/\text{h}$ et 15 utilisateurs par heure ont des besoins de soins via le centre hospitalier CH1 (service des urgences uniquement). La demande en support d'individus actifs pour chaque élément essentiel correspond au nombre d'individus décrits dans les activités essentielles du TcAE. Toutes les autres valeurs de demandes sont nulles.

Par ailleurs, la demande en eau potable se répartissant le long des trois branches de la séquence fonctionnelle SF1, trois coefficients de demande sont à déterminer. Pour les première et troisième branches, les capacités maximales de fourniture de sortie des fonctions essentielles des stations de captage et de production d'eau potable sont de $750\text{ m}^3/\text{h}$ tandis que pour la seconde branche les capacités des éléments essentiels valent $500\text{ m}^3/\text{h}$. Il est donc possible de capter et produire $2000\text{ m}^3/\text{h}$ d'eau potable pour cette séquence fonctionnelle. Les coefficients de demande choisis sont de 0,25 pour la seconde branche et de 0,375 pour les autres branches.

D'autre part, les branches étudiées dans les différentes ramifications des scénarios longs doivent être indiquées dans les paramètres d'opérabilité des fonctions et de stocks de sortie du fait que le service fourni est effectué uniquement via cette branche.

Par exemple, pour le SL1, les deux ramifications qui comportent le bloc 1 proviennent du fait que la station captage A et la station de production d'eau potable sont liés aux supports de distribution d'électricité PSE-A. Ces deux stations réalisant des fonctions essentielles de la séquence fonctionnelle SF1, la suite de la ramification étudie l'état des fonctions aval de la séquence jusqu'à la distribution de l'eau potable aux usagers. Néanmoins, le service d'eau potable circulant correspond uniquement à la valeur de demande réalisée par les fonctions des stations de captage et production d'eau potable d'une branche. En conséquence, lorsqu'on évalue l'opérabilité de la FA9 « Distribuer eau potable » par exemple (fonction essentielle commune aux trois branches), on estime cette valeur uniquement par rapport à la demande de la branche concernée. Cela est également le cas pour les usagers recevant la sortie S9 « Distribution d'eau potable ».

II-3.4.4 Evaluation et analyse des résultats

Afin d'obtenir un résultat unique à chaque pas de temps de simulation concernant l'état des fonctions et la quantité de stocks de sortie, plusieurs expressions sont à déterminer. Les résultats des simulations se focaliseront sur l'estimation :

- Des pertes d'activité des éléments essentiels situés dans les zones d'alimentation ZA1, ZA2, ZA3 et ZA4 ;
- Des stocks de sortie Si de la fonction d'association FA8 « Stocker eau potable » ;
- Du nombre d'individus impactés dans la zone de référence 1.

Par ailleurs, les ramifications des scénarios de propagation SL1, SL2 et SL3 n'ayant pas toutes été décrites, ces résultats sont uniquement extraits des ramifications R1.1, R1.2, R2.1, R2.2, R3.1 et R3.2 (Figure 84 ; Figure 85).

i. Perte d'activité des éléments essentiels

Suite à la simulation des trois scénarios longs, la perte d'activité des éléments essentiels des postes sources PSE-A, PSE-B et PSE-C suite à la perturbation majeure est de 100 % entre l'impact de la perturbation et $t=48h$ (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.** ; Figure 89). Le temps de 48 heures correspond au temps de remise en service des postes sources. Par ailleurs, la valeur de perte d'activité des stations de captage et de production d'eau potable est aussi de 100 % durant la simulation en raison de l'absence de groupes électrogènes de secours (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.** ; Figure 89). Pour tous les autres éléments essentiels du TcAE, la perte d'activité est nulle

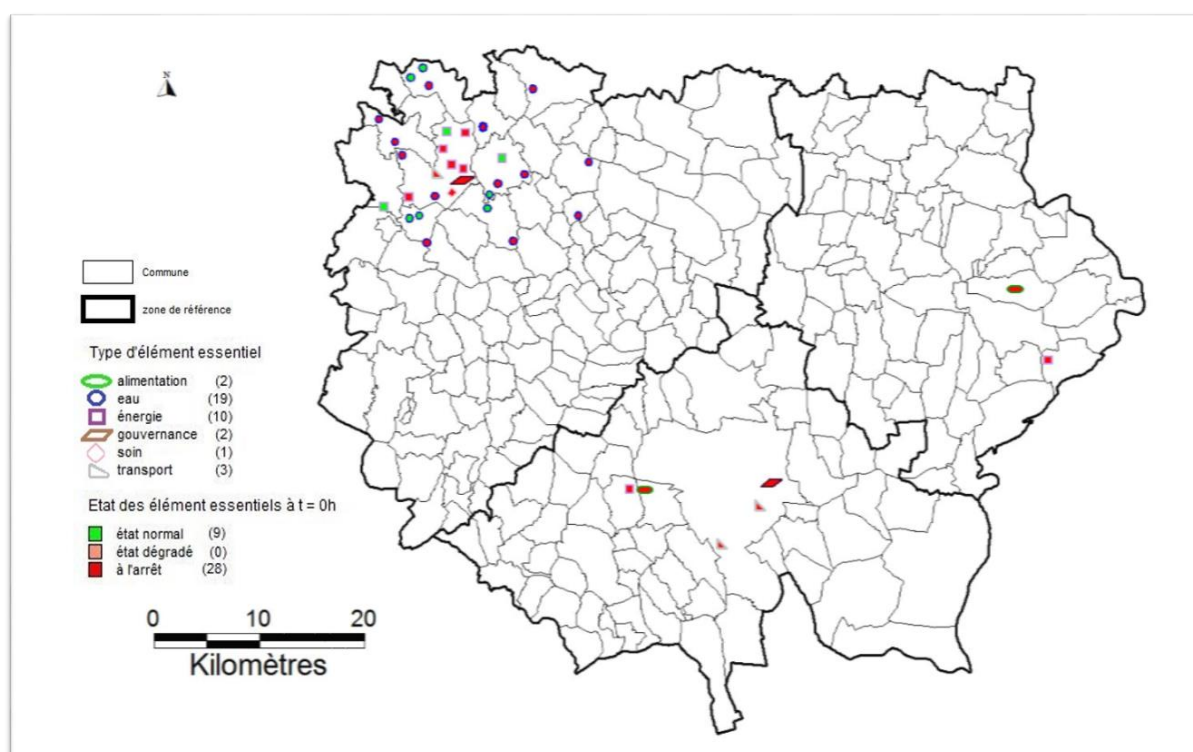


Figure 86 : Cartes des pertes d'activité des éléments essentiels à $t = 0$

D'autre part, à $t = 2$ heures, l'activité de la station d'épuration devient nulle en raison de l'absence d'approvisionnement en carburant de ces groupes électrogènes (Figure 87), en plus des éléments déjà touchés.

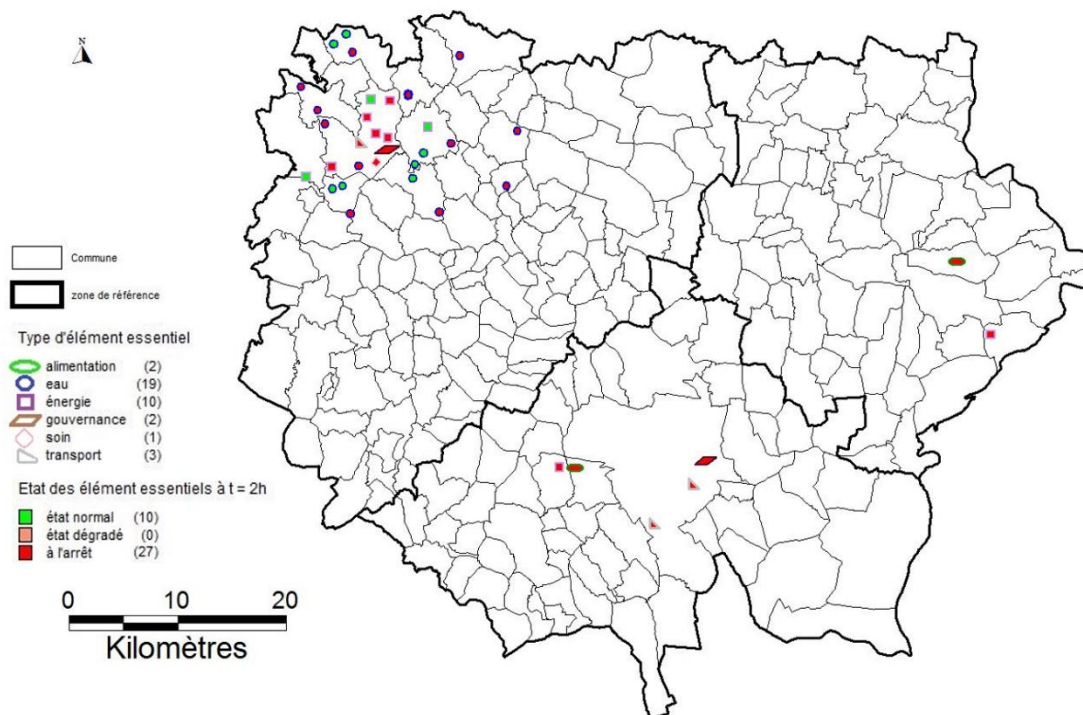


Figure 87 : Cartes des pertes d'activité des éléments essentiels à t = 2 heures

Par ailleurs, l'élément essentiel EE40 « centre hospitalier CH1 » dispose de groupes électrogènes de secours. Néanmoins, cet élément essentiel subit l'interruption du service « distribution eau potable » intervenant à t=6 heures (Figure 88). L'évolution de la perte d'activité de l'EE40 lors de la simulation peut ainsi se résumer par l'expression :

$$E_{jp}(EE40, t) = 0 \% \text{ entre } 0 < t < 6 \text{ et } t \geq 48 \text{ sinon } 100 \%$$

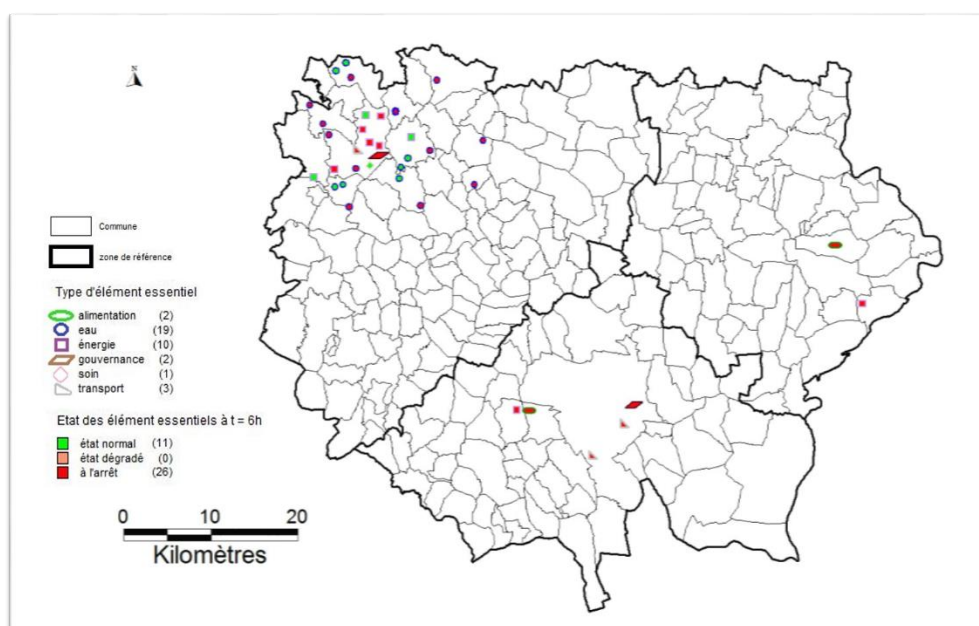


Figure 88 : Cartes des pertes d'activité des éléments essentiels à t = 6 heures

A $t = 48$ heures, l'ensemble des pertes d'activités des éléments essentiels sont nulles (Figure 89).

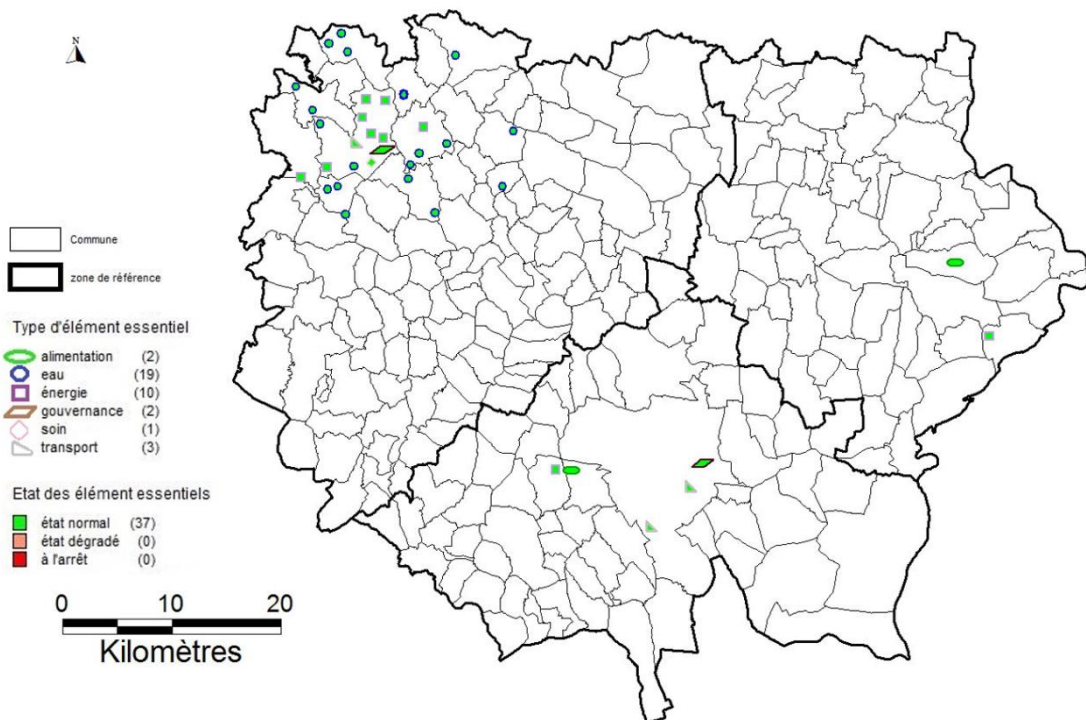


Figure 89 : Cartes des pertes d'activité des éléments essentiels à $t = 48$ heures

ii. Etat des stocks

L'évolution des stocks de sortie Si des fonctions essentielles ou d'association peut également être suivie à partir de la simulation des stocks S8 de la FA8 « Stocker eau potable » suite à l'utilisation de l'entrée E9. Ce résultat s'obtient en deux phases.

D'une part, il faut retenir la valeur des stocks minimale de chaque branche de la séquence fonctionnelle apparaissant dans les différentes ramifications des scénarios longs. L'expression suivante résume ces propos pour B1 :

$$Q_{StocksSi}(S8, E9, B1, FA8, t + dt) = \min(Q_{StocksSi}(S8, E9, B1, FA8, t + dt)) \text{ dans SL1, SL2 et S3}$$

L'expression des stocks apparaît deux fois dans SL1 car la station de captage A et la station de production A utilisent comme support « Distribution d'électricité PSE-A ».

Puis, dans une seconde phase, la valeur des stocks est évaluée en regroupant l'évolution des quantités des trois branches selon l'expression :

$$Q_{StocksSi}(S8, E9, FA8, t + dt) = Q_{StocksSi}(S8, E9, FA8, t) - [(Q_{StocksSi}(S8, E9, B1, FA8, t) - Q_{StocksSi}(S8, E9, B1, FA8, t + dt)) + (Q_{StocksSi}(S8, E9, B2, FA8, t) - Q_{StocksSi}(S8, E9, B2, FA8, t + dt)) + (Q_{StocksSi}(S8, E9, B1, FA8, t) - Q_{StocksSi}(S8, E9, B1, FA8, t + dt))]$$

Il est ainsi possible de constater l'évolution des heures de stocks S8 par rapport à la demande constante en cours du temps (Figure 90). A l'instant initial, les heures de stocks de S8 sont de 5,5 heures ($3900m^3$). A $t = 0$, la valeur d'heures de stocks disponible est de 5,2 heures ($=3700m^3$). Les stocks S8 diminuent de $200 m^3$ car les stocks disponibles des fonctions essentielles des stations de production sont utilisés. Ensuite, il diminue de manière linéaire de $700 m^3$ par pas de temps jusqu'à $t = 5$ h. En effet, à $t = 5$ h, il reste

200 m3 d'eau potable qui permettent d'alimenter en priorité le centre hospitalier CH1 et une partie des utilisateurs. A t=6 h, il n'y a plus d'eau potable à consommer dans les réservoirs.

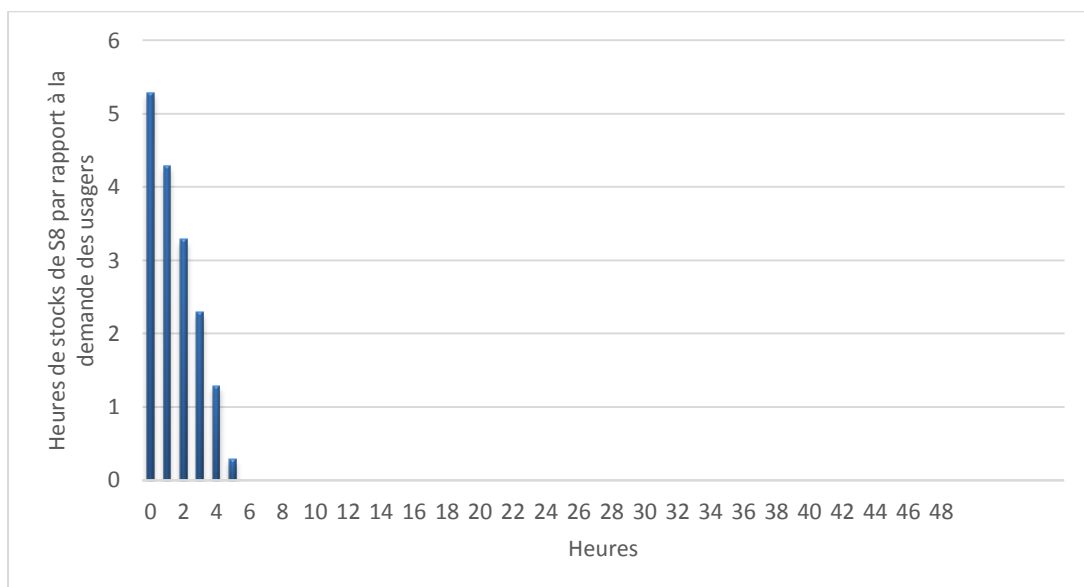


Figure 90 : Evolution temporelle des stocks S8 de la fonction d'association FA8 "Stocker eau potable"

iii. Individus impactés de la zone de référence 1

Les individus impactés de la zone de référence ZR1 (IndividusImpactes(ZR1,t)) sont évalués suite aux besoins des entrées des utilisateurs U1, U2, U3 et U4. Les entrées concernées sont :

- E12 « Distribution eau potable » (IndividusImpactes(E12,U1,ZR1,ZA1,t)) ;
- E13 « Assainissement des eaux usées » (IndividusImpactes(E12,U1,ZR1,ZA1,t)) ;
- E25 « distribution électricité PSE-A » (IndividusImpactes(E25,U2,ZR1,ZA2,t)) ;
- E27 « distribution électricité PSE-B » IndividusImpactes(E27,U3,ZR1,ZA3,t) ;
- E29 « distribution électricité PSE-C » (IndividusImpactes(E29,U4,ZR1,ZA4,t)) ;
- E63 « traitement des patients CH1 » (IndividusImpactes(E63,U1,ZR1,ZA1,t)).

Par exemple, le nombre d'individus impactés suite au besoin de distribution d'eau potable E12 par les utilisateurs U1 s'évalue par l'expression :

$$\begin{aligned} & \text{IndividusImpactes}(E12, U1, ZR1, ZA1, t) \\ &= \text{IndividusTheoriques}(ZA1) * \frac{(\text{DemandeEj}(E12, U1) - \text{ServiceEj}(E12, U1, t))}{\text{DemandeEj}(E12, U1)} \\ & * \text{Forme}(ZA1, ZR1) \end{aligned}$$

Entre $0 \leq t \leq 4$ et $t \geq 48$, le nombre d'utilisateurs impactés est nul. Pour $t = 5$ heures, la perte de service E12 est de 77%. Il y a donc 53 847 individus impactés puis 70 000 entre $6 \leq t \leq 47$. Les mêmes utilisateurs sont également impactés suite à la perte d'entrée E13 à partir de $t=2$ heures.

Dans le cas de l'E63 « Traitement des patients », la perte de service est de 100% entre $6 \leq t \leq 47$ puisque le centre hospitalier CH1 n'est pas en mesure de répondre à la demande de sa zone d'alimentation (en raison de l'interruption du service de distribution d'eau

potable). En conséquent, 70 000 individus n'ont plus accès aux services d'urgence du centre hospitalier CH1.

Concernant les entrées E25, E27 et E29 correspondant au besoin de distribution d'électricité par les utilisateurs U2, U3 et U4, les pertes d'entrée engendrent 45 000 utilisateurs privés d'électricité.

iv. Synthèse des résultats

Ces résultats illustrent les impacts directs et indirects d'une perturbation majeure en cause commune « acte de malveillance » sur trois postes sources électriques. De nombreux éléments essentiels dépendants du réseau électrique disposent de groupes électrogènes permettant de faire face à cette interruption. Toutefois, deux commentaires peuvent être faits afin de proposer des mesures de résilience systémique à engager suite à cette perturbation majeure.

Le réseau d'eau potable est entièrement dépendant de l'électricité fournie par ces trois postes. L'étude des stocks de la fonction FA8 indique qu'au bout de $t=5$ heures, 25% des utilisateurs puis 100% à $t = 6$ heures sont impactés. Le centre hospitalier est également touché dans ce second temps. Les autorités et opérateurs disposent de 5h après le début de la perturbation majeure pour réagir en mettant en place sur site des groupes électrogènes alimentés en carburant pour une durée d'autonomie de 43 heures. La capacité maximale de service des stations de captage et de production EE1 et EE4 ou EE3 et EE6 (valeur de $750 \text{ m}^3/\text{h}$) permettent d'assurer la demande des usagers pendant la perturbation.

Par ailleurs, la station d'épuration du réseau des eaux usées dispose déjà de groupes électrogènes permettant de disposer de deux heures d'autonomie face à une interruption électrique. Cet élément essentiel est alors à alimenter en carburant pour une durée d'autonomie de 46 heures.

Ce scénario d'interruption électrique montre la dépendance des utilisateurs et éléments essentiels face à cette ressource. L'installation de groupes électrogènes est une alternative face à cette perturbation mais implique également une gestion de l'approvisionnement en carburant pour le fonctionnement de ces équipements. Dans un scénario davantage défavorable et avec des éléments essentiels plus nombreux sur les zones d'alimentation d'électricité, la mise en place de carte de priorité pour l'approvisionnement en carburants pourrait être envisagée renforçant ainsi tout l'intérêt d'une telle démarche méthodologique d'analyse des interdépendances d'un TcAE.

Discussion générale et conclusion

L'originalité de la démarche méthodologique développée réside principalement dans la prise en compte des aspects multi-échelles du TcAE, multifonctionnels et intersectoriels des activités essentielles. La population interagissant avec les activités essentielles renforce le caractère innovant de cette démarche méthodologique territoriale.

Ces travaux répondent principalement à l'absence de méthodologies traitant des interdépendances entre les éléments essentiels à bas niveau d'abstraction et au manque d'outil opérationnel de planification des mesures de résilience systémique d'un territoire.

La démarche méthodologique développée s'appuie sur le concept « phare » de Territoire composé d'Activités Essentielles (TcAE). Considéré comme un système complexe ouvert, le TcAE fait l'objet d'une description organique, fonctionnelle et spatiale à différents niveaux de granulométrie.

Afin de suivre la dynamique des échanges de ressources (matière, énergie, informations) à l'intérieur du TcAE, un nouveau formalisme est développé en associant les éléments essentiels et les fonctions essentielles ou d'association qu'ils réalisent. Ce formalisme se distingue par une analyse organique des composants des chaînes essentielles et fonctionnelles. Cette double analyse renforce la spécificité du modèle TcAE par rapport aux méthodes classiques d'analyse des risques. Elle met l'accent sur les ressources entrantes et sortantes en n'étudiant aucun échange à l'intérieur des éléments essentiels. De plus, son originalité est renforcée par le fait qu'un ou plusieurs éléments essentiels réalisent une ou plusieurs fonctions essentielles ou d'association formant les différentes séquences fonctionnelles permettant d'adresser les services essentiels aux différents usagers. Parmi-eux, on trouve les individus composant la population du TcAE. Les individus dits actifs, utilisés par les éléments essentiels pour opérer, sont pris en compte. Ainsi, les liens physiques, cybernétiques, géographiques et individus sont identifiés et illustrent les interdépendances du TcAE.

La mise en place de ce modèle s'appuie sur des typologies communes formant une base de connaissances à l'ensemble des TcAE. Le travail de construction est ainsi facilité.

Par ailleurs, le couplage entre les approches systémique et spatiale contribue à enrichir les possibilités méthodologiques. Il est incontournable pour identifier les implications en termes d'impact concret sur les usagers. Son utilité est multiple : interdépendances géographiques, cas d'une perturbation en mode commun de défaillance (telle qu'un évènement naturel impactant le territoire en de multiples lieux), prise en compte de la mobilité des salariés pour intervenir sur un élément essentiel,...

Cette dimension spatiale, couplée à une approche topologique, si les données le permettent avec un niveau de précision suffisante, est essentielle pour pouvoir affiner la description des réseaux qu'ils soient de transport (routiers, ferroviaires ou fluviaux) ou encore de type canalisations ou réseaux électriques.

Le modèle du TcAE constitue une étape fondamentale pour élaborer, configurer et simuler des scénarios de propagation. Un certain nombre d'hypothèses ont été réalisées afin d'obtenir le modèle développé. Elles ont été discutées lors de la définition des paramètres et caractéristiques ayant servi à la construction du modèle et définissent le

cadre d'application de la méthodologie.

Par ailleurs, le modèle a été conçu de façon à pouvoir intégrer un certain nombre de paramètres/éléments qui peuvent compléter l'approche présentée.

Ainsi, une des limites de la méthodologie concerne la définition des ressources utilisées. Dans le modèle proposé, elles sont paramétrées uniquement de manière quantitative. Les critères de qualité ne sont pas pris en compte qu'il s'agisse des ressources de matières premières ou d'énergie ou de l'information (intégrité, authenticité ou encore confidentialité) ou encore des compétences des individus actifs. Les paramètres de demande n'étant pas remis à jour, la durée de simulation doit s'effectuer sur une échelle temporelle courte (de quelques heures à quelques jours) en raison des mesures organisationnelles prises suite à la perturbation majeure.

Au stade de développement du modèle, les perturbations externes impactent uniquement les éléments essentiels composés d'un élément nœud. Cependant, l'expérience montre que des perturbations peuvent également se produire sur les éléments de type arcs comme lors des pluies verglaçantes au Québec en 1998, les tempêtes Martin et Lothar en France (1999) ou bien comme lors de la catastrophe de Ghislenghien en Belgique (2004). La prise en compte des réseaux est traitée très différemment de celle développée ici. Elle nécessite de s'intéresser à la topologie des réseaux à partir des indicateurs de connexité et connectivité afin de notamment tenir compte de la redondance, c'est-à-dire de l'ensemble des chemins empruntables par la ressource considérée (cas des canalisations d'alimentation en eau potable, des réseaux électriques,...). Pour de nombreuses raisons, cette approche n'a pu être explorée durant ce travail. Comme évoqué par Robert *et al.* (2009), se procurer des données de cet ordre auprès des opérateurs quand bien même elles existeraient avec la fiabilité et la précision requises, est une mission très délicate qui nécessite un travail de longue haleine.

Ceci nous amène à discuter des limites relatives à l'obtention des données succinctement évoquées lors de l'application au territoire pilote. Des travaux menés par Robert *et al.* (2009), et des premiers contacts sollicités durant ce travail de thèse, il a rapidement été identifié qu'il s'agissait là d'un point crucial. Pour cela, fédérer les opérateurs et acteurs institutionnels est indispensable pour obtenir les données nécessaires aux simulations. Notre travail n'a pas fait l'objet d'une collaboration entre toutes les parties prenantes intervenant dans l'amélioration de la résilience systémique d'un territoire. Toutefois, la démarche s'inscrit dans cette logique de travail collaboratif en intégrant des données que nous avons pensé accessibles.

Les principaux apports et limites abordés de ce travail de thèse ouvre alors deux perspectives de nature opérationnelle et conceptuelle.

Une première perspective consiste à poursuivre l'opérationnalisation de la démarche méthodologique à partir d'un outil informatique permettant d'automatiser la démarche proposée notamment sur la partie systémique (modèle du territoire, EE, matrice des liens,...). La mise en place manuelle de cette approche étant fastidieuse, cette automatisation facilitera l'application à d'autres TcAE. D'autre part, la multiplication des scénarios de simulation (différentes perturbations en différents endroits du territoire) permettra d'identifier les EE, CE vulnérables et d'étudier l'efficacité des mesures de résilience systémique envisagées. Enfin, le couplage avec un système d'information géographique facilitera à la fois la recherche et l'extraction des éléments essentiels du territoire et la représentation spatiale des conséquences d'une perturbation majeure.

Par ailleurs, d'autres apports conceptuels peuvent être envisagées dans cette démarche et intégrés dans l'outil informatique. En effet, il est envisageable d'intégrer des formes plus complexes de certains paramètres et caractéristiques. Il s'agit notamment de :

- la variabilité temporelle de la demande suivant l'évolution du comportement du TcAE ;
- la qualité des entrées (authenticité, qualité sanitaire, ...) ;
- l'endommagement (sur le bâti, sur les structures industrielles...) dans le cas des explosions (Cozzani *et al.*, 2006 ; Nguyen, 2009) mais qu'on retrouve aussi pour des problématiques d'inondation ou de séisme permettrait ainsi de mieux caractériser la perte d'intégrité d'un élément essentiel de type nœud mais surtout ce qui n'est pas fait actuellement de l'appliquer aux éléments de type arcs (gazoduc, conduite de gaz,...). Cela permettrait ainsi d'améliorer la prise en compte des liens géographiques ;
- l'accessibilité des éléments essentiels impactés afin de préciser leur temps de remise en service dépendant aujourd'hui uniquement d'une valeur d'impact.

Les apports, limites et perspectives données nous amènent à conclure ce travail.

Ainsi, les travaux de recherche présentés dans ce mémoire de thèse visaient à qualifier et quantifier les impacts directs et indirects liés à la propagation des effets d'une perturbation majeure induisant une indisponibilité partielle ou totale d'un de ces composants essentiels du territoire afin d'évaluer la résilience systémique de celui-ci.

Dans un premier temps, l'état de l'art a consisté à définir la notion de territoire et d'éléments essentiels à sa stabilité, il a également permis de donner une définition de la résilience.

Dans le second chapitre, trente-six méthodologies d'étude des interdépendances entre infrastructures critiques ont été considérées en s'intéressant notamment aux secteurs d'activités ainsi qu'au formalisme de modélisation retenu. Cette analyse a mis en évidence une prise en compte souvent partielle des secteurs d'activités essentiels dans les approches existantes et peu de considération pour le territoire sur lesquelles elles sont implantées.

Il nous a alors paru intéressant de proposer une méthodologie permettant l'étude de la propagation des impacts liés à une perturbation majeure dans un objectif d'une part d'aide à la planification des mesures de continuité et rétablissement d'activités sur un territoire et d'autre part de mise en place de mesures de traitement des risques.

Les concepts et la démarche méthodologique développés pour étudier le comportement d'un Territoire composé d'Activités Essentielles (TcAE) ont fait l'objet des chapitres 3 et 4. Articulée en trois étapes, la démarche méthodologique permet de modéliser dynamiquement le TcAE à différents échelons afin d'évaluer sa résilience systémique à partir de l'étude de scénarios de propagation.

Le concept de TcAE est défini à partir de la réalisation de fonctions vitales quel que soit l'échelon territorial considéré. Ces fonctions vitales sont réalisées par plusieurs types de chaînes essentielles (pilotage/gouvernance ou opérationnelle) fournissant des services. La modélisation ad hoc retenue s'appuie sur la définition de fonctions, d'éléments essentiels utilisant des entrées, des supports et assujettis à des contraintes.

A partir de l'identification des causes et effets de défaut d'un EE, de la défaillance d'une fonction essentielle ou d'association et des individus, des scénarios courts de propagation

s'enchainant pour former des scénarios longs impactant en cascade d'autres entités sont élaborés.

La perte d'activité des EE, l'état des stocks de sortie et le nombre d'individus impactés sont estimés à chaque pas de temps et permettent de caractériser l'état du TcAE et sa résilience systémique.

Le cinquième chapitre de ce manuscrit est dédié à l'application de la méthodologie sur un territoire pilote à l'échelle départementale. Une perturbation majeure « acte de malveillance » sur trois postes sources fait l'objet d'une simulation. Le manque d'eau potable en raison d'une interruption électrique majeure amène à suggérer la mise en service de groupes électrogènes dimensionnés pour assurer la continuité de l'alimentation en eau potable.

La méthodologie démontre alors son utilité pour prévoir des moyens à mettre en place pour contrer la cascade d'évènements non souhaités et améliorer ainsi la résilience du territoire pilote.

En proposant cette nouvelle démarche méthodologique, nous souhaitons répondre à la problématique du renforcement de la résilience des territoires vis-à-vis d'une perturbation majeure d'origine externe (catastrophe d'origine naturelle, accident industriel, pandémie) ou interne (perte ou affluence de ressource,...).

La complexité et l'hétérogénéité des activités essentielles constituaient les principales difficultés à surmonter. La nécessité d'avoir une vision globale et non segmentée des activités essentielles d'un territoire a néanmoins piloté les choix de modélisation retenus.

La méthodologie s'affranchit ainsi des barrières sectorielles et disciplinaires d'une part en s'appuyant sur une analyse multi sectorielle et d'autre part en couplant la modélisation système à l'approche spatiale. Ce concept induit de fait une force d'action dans la réponse opérationnelle à donner face à une perturbation majeure.

Son application sur le territoire pilote a permis de mettre en évidence, qu'il est ainsi possible de prévoir des modes de protection et d'atténuation des impacts d'une perturbation majeure.

Toutefois, la réussite opérationnelle d'une telle approche réside dans l'appropriation qui en sera faite par les décideurs et par l'adhésion des opérateurs et autorités du territoire à cette démarche.

En effet, le point névralgique de l'ensemble des initiatives de protection des infrastructures critiques demeure le partage -et par voie de conséquence l'obtention - des informations nécessaires à l'initialisation du processus; informations qui par ailleurs nécessitent des mises à jour régulières par les opérateurs des infrastructures critiques mais aussi par les services décisionnaires.

La collaboration multi-organisationnelle (opérateurs entre eux et opérateurs avec l'administration) qui paraît pourtant bien légitime au regard des enjeux, est aujourd'hui difficile à établir du fait de l'ampleur de la démarche et de l'implication demandée.

La mise en commun de données stratégiques à forts enjeux économiques ou de sécurité auquel s'ajoute la crainte d'une mauvaise interprétation possible des informations pouvant conduire à une prise de décision inadaptée en cas de crise sont clairement des freins à dépasser, (Robert *et al*, 2009).

Le sujet des infrastructures critiques et de la vulnérabilité des territoires interpelle de plus en plus des acteurs variés au travers de nombreux projets de recherche impliquant les opérateurs. Il faut y voir nous semble-t-il une vraie perspective de mobilisation de

l'ensemble des organisations intéressées allant de la communauté des chercheurs – pourvoyeurs de concepts, méthodologies et outils aux opérateurs et décisionnaires (et ce, aux différents échelons du territoire), tous parties prenantes des politiques visant à accroître la résilience de nos territoires et sociétés.

Bibliographie

- Agence Française d'Ingénierie Système (AFIS), 2014, Systèmes de Systèmes [Document internet], URL : [https://www.afis.fr/nm-is/Pages/Systèmes de systèmes.aspx](https://www.afis.fr/nm-is/Pages/Systèmes%20de%20systèmes.aspx). consultation 15/12/2014
- Agence Nationale de la Recherche (ANR), 2013, Concepts Systèmes et Outils Pour La Sécurité Globale [Document internet], URL : <http://www.agence-nationale-recherche.fr/suivi-bilan/ingenierie-procedes-securite/concepts-systemes-et-outils-pour-la-securite-globale/> consultation le 06/11/2014
- Aldrich, D., 2011, Nucléaire : Comment Fukushima a Changé Les Règles Du Jeu [Document internet], URL : <http://www.paristechreview.com/2011/08/25/nucleaire-fukushima-regles-jeu/> consultation le 06/11/2014
- Allianz Risk Pulse, 2014, Allianz Risk Barometer on Business Risks 2014, 9p.
- Article R.1332-2 Du Code de La Défense, Instruction interministérielle relative à la sécurité des activités d'importance vitale N°6600/SGDSN/PSE/PSN du 7 janvier 2014
- Augusto, V., 2012, Modélisation de Systèmes Complexes, Ecole Nationale Supérieure des mines de St Etienne, Support Power Point
- Autès, M., 1995, Les Sens Du Territoire, Recherches et Prévisions, Persée - Portail des revues scientifiques en SHS, volume 9, p.57–71, doi:10.3406/caf.1995.1680
- Bagheri, E., Baghi, H., Ghorbani, A.A, 2007, An Agent-Based Service-Oriented Simulation Suite for Critical Infrastructure Behavior Analysis, Internationale Journal of Business Process Integration and Management 2
- Barker, K., Haimes, Y.Y, 2009, Assessing Uncertainty in Extreme Events: Applications to Risk-Based Decision Making in Interdependent Infrastructure Sectors, Reliability Engineering & System Safety 94, 819–829, doi:10.1016/j.res.2008.09.008
- Barnes, J., Newbold, K., 2005, Human Is a Critical Infrastructure : Public-Private Partnerships Essential for Resiliency and Response, 1st IEEE International Workshop on Critical Infrastructure Protection
- Barton, D.C., Edison, E.D, Schoenwald, D.A., Cox, R.G. Rhonda, K., 2004, Simulating Economic Effects of Disruptions in the Telecommunications Infrastructure, Sandia National Laboratories Report , 91p.
- Beck, E., 2006, Approche multi-risques en milieu urbain - le cas des risques sismiques et technologiques dans l'agglomération de Mulhouse (Haut-Rhin), Thèse de doctorat, Université Louis Pasteur, 283p.
- Bouchon, S., 2006, The vulnerability of interdependent critical infrastructures systems : epistemological and conceptual state, Institute for the Protection and Security of the Citizen, Report, 99p
- Bouchon, S., L' Identification des infrastructures critiques : réflexion à partir de l' exemple européen, Thèse de doctorat, Université Paris Ouest Nanterre La Défense, 600p.

- Bram, J., Orr, J. and Rapaport, C., 2002, Measuring the Effects of the September 11 Attack on New York City, FRBNY Economic Policy Review, 16p
- Brilhac, J-F., Thibault, O., 2009, Analyse Des Risques Sur Un Territoire - Ebauche D'une Nouvelle Méthode Globale, Techniques de l'Ingénieur
- Brunet, R., Ferras, R., Thery, H., 1993, Les Mots de La Géographie - Dictionnaire Critique, 518p.
- Cagnan, Z., Davidson, R., Guikema, S., 2004, Post-Earthquake Restoration Modeling of Electric Power Systems, 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver
- Chang, S. E., Seligson, H.A, Eguchi, R.T, 1996, Estimation of the Economic Impact of Multiple Lifeline Disruption : Memphis Light, Gas and Water Division Case Study, Technical Report No. NCEER-96-0011
- Clinton, W.J., 1996, Executive Order 13010 - Critical Infrastructure Protection, Federal Register
- COFELY INEO - GDFSUEZ, Syndicat National des Directeurs Généraux des Collectivités Territoriales (SNDGCT), 2013, Guide Pratique Des Responsabilités Des Territoires Face Aux Risques Majeurs, 155p.
- Commissariat Général au Développement Durable (CGDD), 2014, Études & Documents villes résilientes : premiers enseignements tirés d'une synthèse bibliographique, numéro 114, 61p.
- Conrad, S.H., Leclaire, R.J, Reilly, G.P.O, 2006, Modeling and Analysis, Bell Labs Technical Journal 11, 57-71, doi:10.1002/bltj
- Conseil Européen, 2008, Directive 2008/114/CE du Conseil du 8 décembre sur le recensement et la désignation des infrastructures critiques européennes ainsi que l'évaluation de la nécessité d'améliorer leur protection, Journal Officiel de l'Union Européenne, p.75-82
- Groupe de travail Canada - Etats-Unis sur la panne de courant, 2006, Rapport final sur la mise en oeuvre des recommandations du groupe de travail, 70p.
- Coursaget, A., 2011, La sécurité des activités d'importance vitale : premier bilan du SGDSN, Sécurité & Stratégie - Dossier : La Protection Des Installations Vitales, Numéro 4
- Cozzani, V., Gubinelli, G., Salzano, E., 2006, Escalation Thresholds in the Assessment of Domino Accidental Events, Journal of Hazardous Materials A129, doi:10.1016/j.jhazmat.2005.08.012
- Crowther, H., Haimes, Y.Y, 2009, Development of the multiregional inoperability, Systems Engineering 13, 28-46, doi: 10.1002/sys.20130
- Crowther, K.G, 2008, Decentralized Risk Management for Strategic Preparedness of Critical Infrastructure through Decomposition of the Inoperability Input-output Model, International Journal of Critical Infrastructure Protection 1, 53-67, doi:10.1016/j.ijcip.2008.08.009

- Dassens, A., Launay, R., 2008, Étude systémique de l'analyse de risques - Présentation d'une approche globale - Méthode pour une approche systémique de l'analyse de risques, Techniques de l'Ingénieur
- D'Ercole, R., Metzger, P., 2009, La vulnérabilité territoriale : une nouvelle approche des risques en milieu urbain, *Cybergeogeo : European Journal of Geography* [Document Internet], Dossiers, Vulnérabilités urbaines au sud, document 447, URL : <http://cybergeogeo.revues.org/22022> consulté le 11 décembre 2014, DOI : 10.4000/cybergeogeo.22022
- Dauphiné, A., Provitalo, D., 2007, La résilience : un concept pour la gestion des risques, *Annales de Géographie*, p.115-125, doi:10.3917/ag.654.0115
- Dauphine, A., 2001, Risques et Catastrophes : Observer – Spatialiser – Comprendre – Gérer, Armand Collin, Collection U., 288p.
- Dautun, C., 2007, Contribution à l'étude des crises de grande ampleur : connaissance et aide à la décision pour la sécurité civile, Thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure des mines de St Etienne
- Dautun, C., 2009, Une analyse des retours d'expérience des crises de sécurité civile contemporaines, *Cahier de La Sécurité* - n°10, 8p.
- De Porcellinis, S., Panzieri, S., Setola, R., 2009, Modelling Critical Infrastructure via a Mixed Holistic Reductionistic Approach, *International Journal of Critical Infrastructure Protection* 5, Nos.1/2, 86-99
- De Rosnay, J., 1975, *Le Macroscopie*, Edition le Seuil, Paris, 314p.
- Delamare, S., Diallo A.A, Chaudet, C., 2009, High-Level Modelling of Critical Infrastructures Interdependencies, *International Journal of Critical Infrastructure Protection* 5, Nos 1/2, 100-119
- Denis, H., 1993, Gérer Les Catastrophes, L'incertitude À Apprivoiser, Presse Internationale, 248p.
- Denis, H., 2002, La réponse aux catastrophes : quand l'impossible survient, Presse Internationale, 318p.
- Di Méo, G., 1998, *Le Territoire Selon Guy Di Méo - Hypergéogeo*, 1p.
- Donnadieu, G., Karsky, M., 2002, *La Systémique - Penser et Agir Dans La Complexité*, Edition Liaisons, Paris
- Dudenhoefter, D, Hartley, S., Permann, M., 2006, Critical infrastructure interdependency modeling (CIMS) : a survey of critical infrastructure interdependency modeling, *Proceedings of the 2006 Winter Simulation Conference*
- Durand, D., 2006, *La Systémique*, Presses Universitaires de France, 10^e Ed, 128p.
- Elissalde, B., 2005, *Territoire*, Hypergéogeo, 2p.
- European Commission, 2004, Communication from the commission to the council and the European parliament "Critical Infrastructure Protection in the fight against terrorism", Brussels, Belgium

- European Commission, 2006, Communication from the commission on a European Programme for Critical Infrastructure Protection, Brussels, Belgium
- Eusgeld, I., Henzi, D., Kröger, W., 2008, Comparative Evaluation of Modeling and Simulation Techniques for Interdependent Critical Infrastructures. Scientific Report, 50p.
- Eusgeld, I., Kröger, W., Sansavini, G., Schläpfer, M., Zio, E., 2009, The Role of Network Theory and Object-Oriented Modeling within a Framework for the Vulnerability Analysis of Critical Infrastructures, Reliability Engineering & System Safety 94, 954–63, doi:10.1016/j.ress.2008.10.011
- Eusgeld, I., Nan, C., Dietz, S., 2011, System-of-Systems' Approach for Interdependent Critical Infrastructures, Reliability Engineering & System Safety 96, 679–86, doi:10.1016/j.ress.2010.12.010
- Ferber, J., 1995, Les Systèmes Multi-Agents. Vers Une Intelligence Collective, InterEdition, Paris, 522p.
- Forrester, J.W., 1961, Industrial Dynamics, Massachusetts Institute of Technology Press, 464p.
- Présidence de la République Ministère de la défense, 2013, Livre Blanc Défense et Sécurité Nationale, 160p.
- Galland, J-P, 2010, Critique de la notion d'infrastructure critique, Flux, 2010/3 n°81, p.6-18
- Gambino, M., 2010, Politique D'aménagement Du Territoire, Centre d'études et de prospective - service de la statistique et de la prospective
- Garbolino, E., Chéry, J-P. Guarnieri, F., 2010, Modélisation Dynamique Des Systèmes Industriels À Risques. Tec & Doc Lavoisier, Paris
- Giannopoulos, G., Filippini, R., Schimmer, M., 2012, Risk assessment methodologies for critical infrastructure protection - Part I : A state-of-the-art, Institute for the Protection and Security of the Citizen
- Goodwin, B.L, Lee, L., 2005, Planning and assessing effects based operations (EBO), SPARTA - International Command and Control Research and Technology Symposium - The Future of Command and Control
- Griot, Chloe, 2010, Modelling and Simulation for Critical Infrastructure Interdependency Assessment : A Meta-Review for Model Characterisation, International Journal of Critical Infrastructures 6, 363-379, doi:10.1504/IJCIS.2010.037453
- Guézo, B., Verrhiest, G., 2006, Réduire la vulnérabilité urbaine aux risques majeurs, Techni.Cités n°108, 8p.
- Haimès, Y. Y., Horowitz, B.M, Lambert, J.H, Santos, J.R., Lian, C., Crowther, K.G, 2005, Inoperability Input-Output Model (IIM) for Interdependent Infrastructure Sectors: Theory and Methodology, Journal of Infrastructure Systems 11, 67–79
- HANACHI, C., SIBERTIN-BLANC, C., 2014, Introduction Aux Systèmes Multi-Agents, Université Toulouse I

- Hassid, O., 2014, L'impact des attentats du 11 septembre en matière de sécurité d'entreprise [Document internet], URL : <https://www.cdse.fr/l-impact-des-attentats-du-11.html> consultation le 15 septembre 2014
- Haut Comite Français pour la Défense Civique (HCFDC), 2012, Rapport - Risques et Menaces Exceptionnels - Quelle Préparation ? , Rapport D'activité, 114p.
- Haut Comite Français pour la Défense Civique (HCFDC), 2013, RETEX Suite À l'Ouragan Sandy, Rapport, 91p.
- Hollman, J.A., Marti, J.R, Jatskevich, J., Srivastava, K.D., 2007, Dynamic Islanding of Critical Infrastructures : A Suitable Strategy to Survive and Mitigate Extreme Events, Int. J. Emergency Management 4, 45-58
- INHESJ, 2015, Définition Sécurité globale [Documents internet], URL : <http://www.inhesj.fr/> consultation le 30 juillet 2014
- INSEE, 2015, Définitions et Méthodes - Secteur Tertiaire [Document internet], URL : <http://www.insee.fr/fr/methodes/default.asp?page=definitions/secteur-tertiaire.htm>. consultation le 20/01/2015
- Johansson, J., 2010, Risk and Vulnerability Analysis of Interdependent Technical Infrastructures Addressing Socio-Technical Systems, Thèse de doctorat, Lund University, 189p.
- Johansson, J., Hassel, H., 2010, An approach for modelling interdependent infrastructures in the context of vulnerability analysis, Reliability Engineering & System Safety 95, 1335–1344, doi:10.1016/j.ress.2010.06.010.
- Jonkeren, O.E., Ward, D., Dorneanu, B., Giannopoulos, G., 2012, Economic Impact Assessment of Critical Infrastructure Failure in the EU : A Combined Systems Engineering – Inoperability Input-Output Model, Report, 21p.
- Kozin, F., Zhou, H., Zhang, R.H, 1991, System Study of Urban Response and Reconstruction due to Earthquake, Journal of Engineering Mechanics, ASCE 116, 1959–1972.
- Lagadec, P., 1991, La Gestion Des Crises. Outils de Réflexions À L'usage Des Décideurs, Ediscience, 326p.
- Lagadec, P., 2001, Ruptures Créatrices, Education Management, 34-37
- Lagadec, P., 2008, Risques et crises : questions sur nos ancrages, Cahier n° 2008-09, Ecole Polytechniques - CNRS
- Laganier, R., 2013, Améliorer les conditions de la résilience urbaine dans un monde pluriel : des défis et une stratégie sous contrainte." Responsabilité & Environnement n°72, 65-71
- Laprie, J.C, Kanoun, K., Kaâniche, M., 2007, Modelling interdependencies between the electricity and information infrastructures, 26th International Conference, SAFECOMP 2007, Nuremberg, 18-21
- Le Berre, M., 1992, Le Territoire, Encyclopedie de Géographie, Economica, Paris

- Le Moigne, J-L, 1977, *La Théorie Du Système Général*, Presses Universitaires Françaises, Paris
- Leone, F., Vinet, F., 2005, *La Vulnérabilité un concept fondamental au cœur des méthodes d'évaluation des risques naturels*, *La Vulnérabilité Des Sociétés et Des Territoires Face Aux Menaces Naturelles - Analyses Géographiques*, Université Paul-Valéry — Montpellier III, 9-26
- Les services de l'État dans le département des Yvelines, 2014, *Plan ORSEC Des Yvelines* [Document internet], URL : <http://www.yvelines.gouv.fr/Actualites/Plan-ORSEC-des-Yvelines> consultation le 15/09/2014
- Lhomme, S., 2012, *Les réseaux techniques comme vecteur de propagation des risques en milieu urbain - une contribution théorique et pratique à l'analyse de la résilience urbaine*, Thèse de doctorat, Université Paris Diderot, 365p.
- Lhomme, S., Serre, D., Diab, Y., Laganier, R., 2010, *Les réseaux techniques face aux inondations ou comment définir des indicateurs de performance de ces réseaux pour évaluer la résilience urbaine*, *Bulletin de l'Association de Géographes Français*, 487-502
- Luijff, E., Nieuwenhuijs, A., Klaver, M., Van Eeten, M., Cruz, E., 2008, *Empirical Findings on Critical Infrastructures Dependencies in Europe*, *Defense Security and Safety - TNO Knowledge for Business*
- Mallet, J-C, Présidence de la République -Ministère de la défense, 2008, *Défense et Sécurité Nationale - Le Livre Blanc*, Odile Jacob/La Documentation Française, 350p.
- Maquin, D., 2008, *Éléments de Théorie Des Graphes et Programmation Linéaire*, Institut National Polytechnique de Lorraine - Ecole Nationale Supérieure d'Electricité et de Mécanique
- Marconis, R., 2014, *Regions, espaces géographiques, ou territoires ? : Les Hésitations de Géographes Français*, *Reponsabilité & Environnement* n°74
- Michel-Kerjan, Erwann, 2002, *Risques Catastrophiques et Réseaux Vitaux : De Nouvelles Vulnérabilités*, *Flux - Cahiers Scientifiques Internationaux Réseaux et Territoires*, 1-20
- Michel-kerjan, E., 2003, *New Challenges in Critical Infrastructures : A US Perspective*, *cahier n°2003 -004*, Ecole Polytechnique - CNRS
- Ministère de l'Ecologie du Développement Durable et de l'Energie (MEDDE), 2013a, *Le risque technologique : panorama des accidents industriels survenus lors du grand séisme et tsunami de Tohoku*, *Rapport*, 110p.
- Ministère de l'Ecologie du Développement Durable et de l'Energie (MEDDE), 2013b, *Vulnérabilité Des Réseaux D'infrastructures Aux Risques Naturels*, *Rapport*, 102p.
- Ministère de l'économie et des finances, 2014, *Wassily Leontief* [Document internet], URL : <http://www.economie.gouv.fr/facileco/wassily-leontief> consultation le 15/09/2014
- Moine, A., 2005, *Le territoire comme un système complexe - des outils pour l'aménagement et la géographie*, *Septièmes Rencontres de Théo Quant*

- Montaron, N., 2012, Le territoire des autres - Atmosphere 53 [Document internet], URL : <http://www.atmospheres53.org/docs/territoiredesautrespedago> consultation le 11 août 2014
- Morère, Y., 2002, Cours de Réseau de Petri, Document de cours, 54p.
- Muis, A-S, 2014, Territoire, Identité et Gouvernance : Quelle Équation Pour Un Développement Durable?, Cybergéo : European Journal of Geography [Document internet], URL : <http://cybergegeo.revues.org/26246> consultation le 11 août 2014, doi:10.4000/cybergegeo.26246
- McDaniels, T., Chang, S., Peterson, K., Mikawoz, J., Reed, D., 2007, Empirical Framework for Characterizing Infrastructure Failure Interdependencies, Journal of Infrastructure Systems 13, doi:00000003540001496830010
- Nguyen, Q.B., 2009, Fiabilité Des Installations Industrielles Sous Impact de Fragments de Structures - Effet Domino, Thèse de doctorat, Université Paris-Est, 156p.
- Nojima, N., Ishikawa, Y., Okumura, T., Sugito, M., 2001, Empirical Estimation of Lifeline Outage Time in Seismic Disaster, Proceedings of U.S.-Japan Joint Workshop and Third Grantee Meeting, U.S.-Japan Cooperative Research on Urban Earthquake Disaster Mitigation edited by WA, 576–577, Seattle
- Nojima, N., Kameda, H., 1992, Optimal strategy by use of tree structure for post-earthquake restoration of lifeline network systems, Proceedings of the 10th World Conference on Earthquake Engineering, 5541–5546, Rotterdam
- OCDE, 2003, Les Risques Émergents Au XXI^e Siècle - Vers Un Programme D'action, Rapport, 325p.
- OCDE, 2014, Étude de l'OCDE Sur La Gestion Des Risques D'inondation : La Seine En Île-de-France 2014, Rapport, 220p, doi:10.1787/9789264207929-fr
- Oliva, G., Panzieri, S., Setola, R., 2010, Agent-based input-output interdependency model, International Journal of Critical Infrastructure Protection 3, 6–82. doi:10.1016/j.ijcip.2010.05.001
- Ouyang, M., 2014, Review on Modeling and Simulation of Interdependent Critical Infrastructure Systems, Reliability Engineering & System Safety 121, 43–60, doi:10.1016/j.ress.2013.06.040
- Ouyang, M., Dueñas-Osorio, L., 2011, An Approach to Design Interface Topologies across Interdependent Urban Infrastructure Systems, Reliability Engineering & System Safety 96, 1462–1473, doi:10.1016/j.ress.2011.06.002
- Owusu, A., Mohamed, S., Anissimov, Y., 2010, Input-output impact risk propagation in critical infrastructure interdependency, In Proceedings of the International Conference on Computing in Civil and Building Engineering, Nottingham
- Panzieri, S., Setola, R., Ulivi, G., 2005, An approach to model complex interdependent infrastructures, Proceedings of the 16th IFAC World Congress, République Tchèque
- Parlement Européen, 2008, Directive 2008/114/CE du conseil du 8 décembre sur le recensement et la désignation des infrastructures critiques européennes ainsi que

l'évaluation de la nécessité d'améliorer leur protection, Journal Officiel de l'Union Européenne, 75-82

Pederson P., Dudenhoefter D., Hartley S., Permann M., 2006, Critical Infrastructure Interdependency Modeling: A Survey of Critical Infrastructure Interdependency Modeling, Idaho National Laboratory, United-States of America

Périlhon, P., 2002, Du risque à l'analyse de risque – MOSAR-, Méthode Organisée et Systématique D'analyse Du Risque, Cours de Mastère Sécurité Industrielle et Environnement, Ecole Des Mines d'Alès, 177p.

Perrow, C. 1999. Normal Accident : Living with High-Risk Technologies. Princeton, 439p.

Petit, F., 2009, Concepts d'analyse de la vulnérabilité des infrastructures essentielles - Prise en compte de la cybernétique, Thèse de doctorat, Ecole Polytechnique de Montréal

Petit, F., Robert, B., Rey, B., 2010, Protection Des Infrastructures Critiques, Techniques de l'Ingénieur

Pitrat, D., 2011, Impacts du séisme de Tohoku sur l'industrie Japonaise, Face Au Risque n°474 - Juin-Juillet 201, 4p.

Porcellinis, S, Setola, R., 2008, Simulation of Heterogeneous and Interdependent Critical Infrastructures, International Journal of Critical Infrastructure Protection 4, 110-128

Porod, C., Petit, F., Peerenboom, J., Fisher, R., Raess, J., 2012, Global evolution of critical infrastructure protection, Next Generation Disaster and Security Management, 133-45

Provitolo, D., 2006, La dynamique des systèmes selon J.W. Forrester, Hypergéométrie, 3p.

Quenault, B., 2014, La rhétorique de la résilience dans la gestion des risques de catastrophe : un changement de paradigme face aux risques climatiques, Séminaire Résilience Urbaine

Rahman, H.A., Beznosov, K., Martí, J.R., 2009, Identification of sources of failures and their propagation in critical infrastructures from 12 years of public failure reports, International Journal of Critical Infrastructure Protection 5, 220-44

Reghezza, M., 2005, La vulnérabilité : un concept problématique, La Vulnérabilité Des Sociétés et Des Territoires Face Aux Menaces Naturelles - Analyses Géographiques, Université Paul-Valéry — Montpellier III, 35-40

Reitel, B., 2004, Frontière, Hypergéométrie, 3p.

Rey, B., Tixier, J., Bony-dandrieux, A., Dusserre, G., Munier, L. Lapebie, E., 2013, Interdependencies Between Industrial Infrastructures : Territorial Vulnerability Assessment, Chemical Engineering Transactions 31, 61-66

Rinaldi, S. M., Peerenboom, J. P., Kelly, T. K., 2001, Identifying Understanding and Analyzing, IEEE Control Systems Magazine, 11-25

- Robert, B., Wagner, G., Hemond, Y., 2008, *Réflexions sur la place de l'humain dans les interdépendances entre infrastructures essentielles*, Document de travail - Centre Risque&Performance de l'Ecole Polytechnique de Montréal, 12p.
- Robert, B., Morabilto, L., 2009, *Réduire la vulnérabilité des infrastructures essentielles - guide méthodologique*, Lavoisier, Paris
- Robert, B., Morabilto, L., Quenneville, Q., 2007, The preventive approach to risks related to interdependent infrastructures, *International Journal Emergency Management* 4, 166–82
- Rufat, S., 2007, *L'estimation de la vulnérabilité urbaine - un outil pour la gestion du risque - Approche à partir du cas de l'agglomération Lyonnaise*, Géocarrefour 82/1-2
- Sampognaro, R., Sicsic, M., 2012, *Impact du séisme au Japon sur l'économie mondiale*, Ministère de l'Economie des finances et de l'industrie
- Santella, N., Steinberg, L.J., Parks, K., 2009, Decision making for extreme events : modeling critical infrastructure interdependencies to aid mitigation and response planning, *Review of Policy Research* 26
- Santos, J.R., 2006, Inoperability input-output modeling of disruptions to interdependent economic systems, *Systems Engineering* 9, 20–34, doi:10.1002/sys.20040
- Santos, J.R., Haimés, Y.Y., 2004, Modeling the demand reduction input-output (I-O) inoperability due to terrorism of interconnected infrastructures, *Society for Risk Analysis* 24
- Schoenwald, D.A., Barton, D.C., Ehlen, M.A., *An agent-based simulation laboratory for economics and infrastructure interdependency*, Report, Sandia National Laboratories, 17p.
- Schweisguth, D., 2011, *Japon : Séisme et Tsunami, quel impact sur la croissance ?* [Document internet], URL : <http://www.ofce.sciences-po.fr/clair&net/clair&net-82.htm> consultation le 11 août 2014
- Secretariat Général de Défense et de Sécurité Nationale (SGDSN), 2011, *Plan National de Prévention et de Lutte « Pandémie Grippale » - Document d'aide à la préparation et à la décision*
- Secretariat Général de Défense et de Sécurité Nationale (SGDSN), 2014a, *Instruction générale interministérielle relative à la sécurité des activités d'importance vitale*, N ° 6600 / SGDSN / PSE / PSN du 7 Janvier 2014
- Secretariat Général de Défense et de Sécurité Nationale (SGDSN), 2014b, *Partie publique du plan gouvernemental de vigilance, de prévention et de protection face aux menaces d'actions terroristes*
- Seifert, J.W., 2002, The effects of september 11, 2001, terrorist attacks on public and private information infrastructures : a preliminary assessment of lessons learned, *Government Information Quarterly* 19, 225–242. doi:10.1016/S0740-624X(02)00103-X
- Serre, D., Barroca, B., Laganier, R., 2012, *Resilient and Urban Risk Management*, CRC Press

- Setola, R., De Porcellinis, S., Sforza, M., 2009, Critical infrastructure dependency assessment using the input-output inoperability model, *International Journal of Critical Infrastructure Protection* 2, 170–178, doi:10.1016/j.ijcip.2009.09.002
- Shinozuka, M., Rose, A., Eguchi, R.T., 1998, Engineering and socioeconomic impacts of earthquakes : an analysis of electricity lifeline disruptions in the new Madrid area, Monograph No.2, MCEER, NY
- Signoret, J-P, 2008, Analyse des risques des systèmes dynamiques : réseaux de petri, *Techniques de l'Ingénieur*, 15p.
- Tabucchi, T., Davidson, R., Brink, S., 2008, Restoring the los angeles water supply system following an earthquake, In 14th World Conference on Earthquake Engineering, China
- Toroczka, Z., Eubank, S., 2005, Agent-based modeling as a decision-making tool, *The Bridge - Linking Engineering and Society* 35, 22-27
- Toubin, M., Lhomme, S., Diab, Y., Serre, D., Laganier, R., 2012, La résilience urbaine : un nouveau concept opérationnel vecteur de durabilité urbaine ?, *Développement Durable et Territoires* 3
- Trucco, P., Cagno, E., Ambroggi, M.D., 2012, Dynamic functional modelling of vulnerability and interoperability of critical infrastructures, *Reliability Engineering & System Safety* 105, 51–63, doi:10.1016/j.ress.2011.12.003
- UNISDR. 2012. How to Make Cities More Resilient. A Handbook for Local Government Leaders, 100p.
- Veyret, Y., Reghezza, M., 2006, Vulnérabilité et risques - L'approche récente de la vulnérabilité, *Reponsabilité & Environnement* n°43, 9-14
- Voiron, C., Chery, J-P., 2005, Espace géographique spatialisation et modélisation en dynamique des systèmes, In 6ième Congrès Européen de Science Des Systèmes, 10p.
- Walliser, B., 1977, Systèmes et modèles - Introduction critique à l'analyse de systèmes, Seuil, Paris
- Wang, S., Sarker, B., Mann, J.L., Triantaphyllou, E., 2004, Resource planning and a depot location model for electric power restoration, *European Journal of Operational Research* 155, 22–43
- Xu, N., Guikema, S., Davidson, R.A., Nozick, L.K., Cagnan, Z., Vaziri, K., 2007, Optimizing scheduling of post-earthquake electric power restoration tasks, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 265–284
- Yaeger, J., Eaton, L., Collins, M., Petit, F., 2012, Circumvention strategies and critical infrastructure protection, In *Next Generation Disaster and Security Management*, 122–132
- Yusta, J.M., Correa, G.J., Lacal-Arántegui, R., 2011, Methodologies and applications for critical infrastructure protection : state-of-the-art, *Energy Policy* 39, 6100–6119. doi:10.1016/j.enpol.2011.07.010

- Zhang, P., Peeta, S., Friesz, T., 2003, Dynamic game theoretic model of multi-layer infrastructure networks, In 10th International Conference on Travel Dimensions of Travel, 10-15
- Zimmerman, R., 2002, Réseaux d'infrastructures - Enjeux et gestion des interactions entre les différents réseaux d'infrastructures Flux, 2002/1 n°47, 54-68
- Zimmerman, R., 2004, Decision-making and the vulnerability of interdependent critical infrastructure, Report, 9p.
- Zimmerman, R., Restrepo, C.E., 2006, The next step: quantifying infrastructure interdependencies to improve security, International Journal of Critical Infrastructures 2, 215-230, doi:10.1504/IJCIS.2006.009439

Annexes

Annexe 1

1A : Association méthodologies et outils d'analyse des interdépendances

	Outils d'analyse des interdépendances							
	Simulation systèmes multi-agent	Outil à base de graphes	Dynamique des systèmes	Modèle non-opérabilité entrée-sortie	Réseaux de pétri	Formalisme M&S ad-hoc	Courbe/ diagramme/ matrice	Base de données
1							1	
2		1						
3								1
4	1							
5	1							
6	1							
7						1		
8								1
9	1							
10				1				
11				1				
12				1				
13				1				
14				1				
15				1				
16	1							
17			1					
18		1						
19	1							
20							1	
21						1		
22						1		
23								1
24			1					
25							1	
26	1							
27						1		
28							1	
29	1							
30	1							
31	1							
32				1				
33					1			
34				1				
35	1							
36								1
37		1						

1A Etude des méthodologies de l'approche empirique (Complément du chapitre 2)

Les méthodologies [3], [8], [23] et [36] utilisent une base de données. Ces dernières sont construites à partir de différentes sources (journaux, des rapports techniques, documents des autorités,...) et une ou plusieurs bases de données existantes. La méthodologie [36] utilise la base de données TNO Critical infrastructure disruption alors que la méthodologie [8] utilise la base de données Nexus-Lexus et des journaux (Montréal Gazette, Ottawa Citizen, New York Times, Toronto Star, Miami Herald,...) pour constituer un outil global.

Les informations recensées à introduire dans la base de données peuvent être classés en quatre données d'entrée décrite de manière globale (figure 22) :

- Les sources d'informations ;
- Les caractéristiques des infrastructures critiques touchées ;
- Les événements ;
- Les impacts des événements.

La première donnée d'entrée concerne les sources d'informations alimentant la base de données. Il va s'agir des différents types de sources comme des journaux ou des témoignages mais aussi les dates des sources identifiées. La seconde donnée d'entrée concerne les informations sur les caractéristiques des IC touchées comme le type ou l'ordre d'interdépendances mais aussi sur des paramètres opérationnels ou organisationnels. Les informations concernant les événements survenus constituent la troisième donnée d'entrée. Celle-ci récolte des informations potentielles sur le type d'évènement et son origine mais aussi sur son étendue et sa durée. La dernière donnée d'entrée concerne tous les impacts engendrés par l'évènement sur les IC et son environnement.

Dans le cadre de l'étude des données d'entrée utilisées par les bases de données, l'étude des dimensions de ces informations n'a pas réellement d'intérêt. Toutefois, il convient de noter que les dimensions des informations entrées dans la base de données sont multidimensionnelles pour la caractéristiques des IC touchées (techniques et organisationnelles) et pour les impacts des événements (spatiale, sociale, technique, économique). Les sources d'informations et les événements n'ont pas de dimension.

L'ensemble des caractéristiques des données contenues dans les outils mettent en avant plusieurs types de résultats (indicateurs, ratio, distribution,...) décrits dans la suite du document.

La construction d'une base de données permet la mise en place de plusieurs résultats sous forme d'indicateur, de ratio ou de distribution évaluant les conséquences des interdépendances entre infrastructures critiques dans le cadre de cette revue. Globalement, le but de ces indicateurs est d'améliorer la compréhension des interdépendances entre les infrastructures critiques à partir de l'étude d'un nombre restreint ou une multitude d'évènements. Il y a vingt-trois résultats pour les quatre méthodologies étudiées (figure 22). Il s'agit uniquement des résultats mis en avant par les auteurs dans les publications. Plusieurs remarques sont établies en lien avec les données d'entrée mises en évidence auparavant.

La première donnée d'entrée concernait les sources de données. Bien que ces informations ne concernent pas directement les IC, des résultats à ce sujet sont déterminés afin de détailler ces sources qui ont pris part à l'élaboration de la base de données et des autres résultats. La méthodologie [23] émet le résultat 7 concernant la distribution des types de sources sur la base de 347 événements étudiés.

La seconde donnée d'entrée a mis en avant les caractéristiques des IC à intégrer dans les bases de données. Les résultats 1 et 2 de la méthodologie [3] et le résultat 23 de la méthodologie découlent de cette catégorie. Les résultats 1 et 2 sont établis sous forme de ratios afin d'indiquer le nombre de fois qu'une IC impacte une autre IC sur le nombre de fois qu'elle subit la défaillance d'une autre IC et la durée de la panne de ressource d'une IC sur la durée de coupure d'alimentation électrique. Ces résultats 1 et 2 sont estimés à partir respectivement de l'étude de 14 et 100 événements. Le résultat 21 (méthodologie [36]) est un indicateur de fréquence qui estime la position des secteurs d'IC dans l'effet cascade à partir de mille sept cent quarante-neuf événements.

La donnée d'entrée concernant les événements intégrés dans les bases de données émettent les résultats 8, 9, 10, 11, 12, 17, 20, 21 et 22 de la méthodologie [23] par l'étude de 347 événements. Cette étude se focalise essentiellement sur les événements issus de secteurs des communications. Les résultats sont des distributions sur l'origine, le type, l'échelle d'impact et le lieu de l'événement ainsi que la répartition de ces événements dans le temps et selon les secteurs d'IC touchés.

Les derniers résultats sont issus de la donnée d'entrée sur les impacts des événements. Dans le cas de la méthodologie [8], les conséquences sont estimées suite à un blackout en fonction de la population touchée, l'étendue spatiale, la sévérité et la dimension des impacts (résultats 3, 4, 5 et 6). La population touchée est également un résultat issu de la méthodologie [3]. L'étendue spatiale et la sévérité des impacts sont également évoquées dans [23]. L'étude de la sévérité des impacts est multidimensionnelle car elle fusionne les conséquences des dimensions économiques, sociales ou encore environnementales.

Malgré le faible nombre de méthodologies étudiées dans cette revue méthodologique, plusieurs critiques peuvent être faites sur les données d'entrée et résultats identifiés.

Concernant les données d'entrée, il est souligné que celles-ci se concentrent sur les sources d'informations, les caractéristiques des IC touchées, les événements et leurs impacts. Or, aucune de ces informations ne fait allusion aux mesures mises en place par les IC pendant l'événement. Il peut s'agir des mesures concernant les capacités de résistance, d'absorption ou de remise en service des IC (d'après la définition de la résilience de temps court prise par Toubin et al. 2012). Par exemple, l'efficacité des barrières de protection, l'établissement de ressources alternatives et les ressources mises en place pour la remise en service ne sont pas intégrées dans les bases de données. Il en résulte qu'aucun résultat ne fasse illusion à ces capacités des IC. D'autre part, il ressort que le rôle de la gouvernance des territoires en l'occurrence les informations de dimension institutionnelle n'est également pas pris en compte. Toutefois, les résultats se focalisent sur les événements possibles et leurs impacts ainsi que sur des caractéristiques techniques des IC touchés comme l'ordre d'interdépendances. Ces informations sont alors utilisées pour élaborer des scénarios afin de représenter et simuler le comportement des interdépendances entre les IC par des méthodologies prédictives.

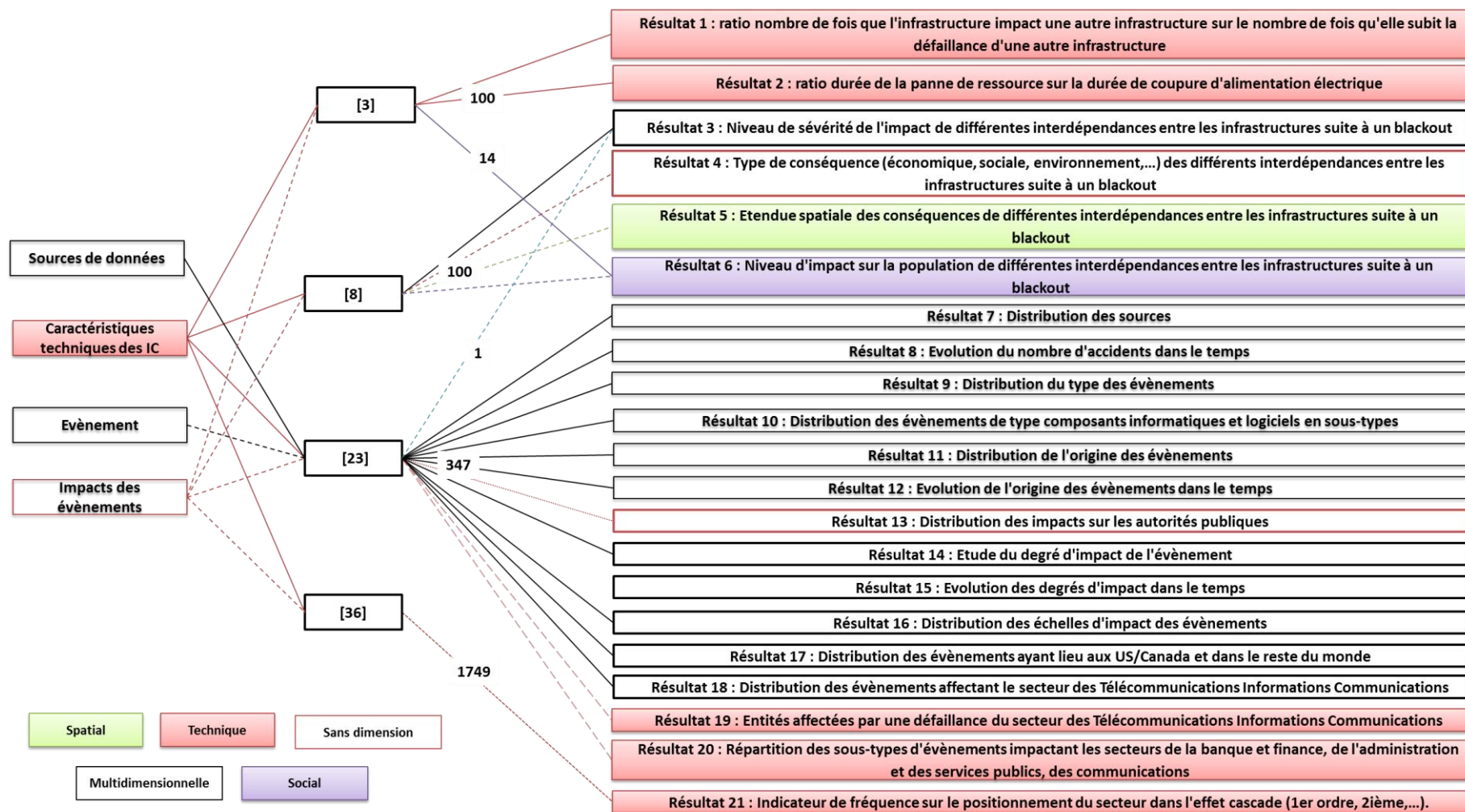


Figure 91 : Formalisme multidimensionnel des données d'entrée et résultats appliqués aux méthodologies empirique

Annexe 2

Sous catégories des données d'entrée des outils d'analyse des interdépendances

Sous-catégories de données d'entrées	Système multi-agents	Outil à base de graphes	Dynamique des systèmes	Modèle non-opérabilité entrée sortie	Réseaux de Pétri	Formalisme de modélisation et simulation ad-hoc	Courbes/ Arbres
1.1 Améliorer l'organisation pour augmenter les connaissances sur les signaux d'alertes précoces	X					X	
1.2 Apprendre du REX	X					X	
1.3 Améliorer l'organisation pour accélérer la continuité d'activité	X					X	
1.4 Prévenir les utilisateurs des services essentiels pour réduire leur demande en cas d'un évènement	X					X	
1.5 Améliorer l'organisation pour accélérer la coordination et les décisions de remise en service	X					X	
2.1 Mise en place d'un dispositif de sécurité et d'un système d'alerte (clôtures, barrières,..)	X		X		X	X	X
3.1 Optimiser le fonctionnement des IC	X	X	X		X	X	X
3.2 Mettre en place les mesures de continuité d'activité	X		X		X	X	
3.3 Gérer le comportement du consommateur pour ajuster le service du système en cas d'urgence	X					X	
4.1 Optimisation la remise en service	X	X	X		X	X	

Tableau 27 : Sous-catégories de données d'entrée des outils d'analyse des interdépendances

Sous-catégories de données d'entrées	Système multi-agents	Outil à base de graphes	Dynamique des systèmes	Modèle non-opérabilité entrée sortie	Réseaux de Pétri	Formalisme de modélisation et simulation ad-hoc	Courbes/ Arbres
5.1 Interdépendances physiques	X	X	X	X	X	X	X
5.1 Interdépendances cybernétiques	X	X	X			X	
5.1 Interdépendances géographiques	X					X	
5.1 Interdépendances logiques	X					X	
6.1 Déclenchement en cascade	X	X	X	X	X	X	X
6.2 Déclenchement en escalade	X		X		X	X	
6.3 Déclenchement en cause commune	X	X	X		X	X	
7.1 Contexte social	X					X	
7.2 Contexte économique	X					X	

Tableau 28 : Sous-catégories de données d'entrée des outils d'analyse des interdépendances (suite)

Annexe 3

Interdependencies Between Industrial Infrastructures: Territorial Vulnerability Assessment

Article publié durant la thèse, Revue Chemical Engineering Transactions, DOI : 10.3303/CET/33/331011)

Benjamin Rey^{*a}, Jerome Tixier^a, Aurelia Bony-Dandrieux^a, Gilles Dusserre^a, Laurent Munier^b, Emmanuel Lapebie^b

^aInstitute of Risk Science (ISR), Ecole des Mines d'Alès, France

^bCEA, Gramat, BP80200, 46500 Gramat, France

*benjamin.rey@mines-ales.fr

Industrial activities are increasingly dependent on each other. Several recent events (e.g. Tsunami and earthquake in Japan in 2011) illustrate the consequences (e.g. humans, economic...) of interactions between industrial infrastructures. The state-of-the-art review focused mainly on the risk assessment and interdependencies between critical infrastructures. The aim of this paper is to present an approach able to determine an infrastructure vulnerability level and risk scenarios development based on Seveso regulations and critical infrastructures. The vulnerability infrastructure level is assessed with a multi-criteria analysis. The goal is to identify several criteria according to physic, functional, economic, social and environment context of the infrastructure in the territory. The risk scenarios are developed in order to estimate the consequences in a territory of a threat on one or several infrastructures.

1. Introduction

The Japan earthquake and tsunami of 2011 that destroyed 30% of the electricity production plants illustrate the interdependencies between industrial infrastructures. This event simultaneously the shut-down of 4 other refineries and fires in two others refineries (Pitrat, 2011). The ice storm in Quebec in 1998, attacks on the World Trade Center in New York in 2001, the Indian Black out in 2012 are others examples of major failures. It enhances the need for research on the functional and spatial dependencies between industrial activities.

Based on the description of different events, this study aims at building a methodology able to describe an infrastructure vulnerability level and risk scenarios in a local context composed by critical and Seveso infrastructures. The study is particularly focused on domino effects because of the functional and geographic interdependencies between infrastructures at territorial scale.

In this article, the first part is a state-of-the-art review of the academic literature in the field of risk between infrastructures. The second part describes the different approach's steps to demonstrate the added-value of this study.

2. Main points of the literature

This part describes the elements of literature dealing with interdependencies between industrial infrastructures. At first, we made the choice to select for our research only critical infrastructures and infrastructures concerned by the SEVESO European Directive because of their relevance and their capacity to generate domino effects. These elements are introduced. Then, the notion of risk assessment for infrastructure protection is analyzed. Different modeling techniques of interdependencies between critical infrastructures and several studies on vulnerability infrastructures are outlined.

2.1 Elements of the system

Our survey is focused on critical infrastructures and infrastructures concerned by the SEVESO Directive. In the context of homeland security, the United States were pioneers to investigate in this field, with the publication in 1997 of the report of Critical Foundations Protecting America's infrastructure, after the Oklahoma City bombing in 1995 (President's Commission on Critical Infrastructure Protection, 1997). After New York and Madrid terrorist attacks in 2001 and 2004, respectively, many programs appeared in several countries on critical infrastructure protection. The focus was clearly on terrorist attacks but also on natural disasters and industrial accidents. These infrastructures are defined critical because of their essential resource (e.g. electricity, gas).

In 2004, European Council and the European Commission concentrate their efforts on the analysis of critical infrastructure protection against terrorists threats (COM, 2004). The European Commission adopted in 2006 (COM, 2006) the basis and operations of the European Program of Critical Infrastructure Protection (EPCIP). The framework of the program is decomposed in several parts:

- Setting up a Directive which was adopted in 2008 (Directive 2008/114/CE) ;
- Measures in order to facilitate the EPCIP implementation : action plan, Critical Infrastructure Warning Information System (CIWIN) to improve the exchange of alert messages, experts, procedures to share information about critical infrastructure protection
- Help of member states of national critical infrastructures ;
- Intervention plans ;
- International scope (cooperation with external countries of Europe) ;
- Financials accompanying measures.

In the Directive 2008/114/CE, European critical infrastructures are defined as "critical infrastructure located in Member States the disruption or destruction of which would have a significant impact on at least two Member States" whereas Critical Infrastructure "means an asset, system or part thereof located in Member States which is essential for the maintenance of vital societal functions, health, safety, security, economic or social well-being of people, and the disruption or destruction of which would have a significant impact in a Member State as a result of the failure to maintain those functions". Two sectors of European critical infrastructures are concerned by the directive: energy (electricity, oil, gas) and transports (road/air/rail transport, inland waterways transports, ocean and short-sea shipping and ports). For the moment, the others sectors (e.g. water, health) are decided by each member state for national critical infrastructure. In order to identify critical infrastructure, a survey highlights that geographic approach is very beneficial (Bouchon, 2011).

Furthermore, most of the literature deals with critical infrastructures and target on the assessment of the interdependencies. Hence, Rinaldi (2001) defines six main dimensions of interdependencies between critical infrastructures. Infrastructure environment (e.g. socio-economic context, public policy) is the only dimension that takes into account the concept of the context (Bouchon, 2011). The others are more technical: type of interdependencies (Figure 1), infrastructure features (e.g. operational and organizational factors), state of operation (e.g. disrupted, normal), coupling and response behavior (e.g. linear or complex interactions, coupling degree) and type of failure (e.g. common cause, escalating).

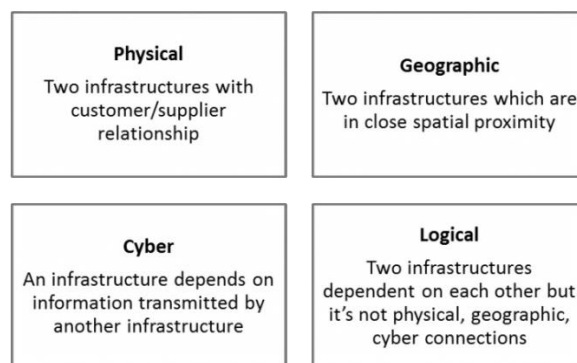


Figure 1: Type of interdependencies (based on Rinaldi et al., 2001)

These kinds of interdependencies between two entities are at the origin of domino effect (Robert and Morabito, 2011). In other cases, domino effects happen only because of the proximity between different elements (e.g. units, establishments). Within the European Union, domino effects are defined by Seveso II Directive as "establishments or groups of establishments where the likelihood and the possibility or consequences of a major accident can be increased because of the location and the proximity of such establishments and their inventories of dangerous substances" (Council Directive 96/82/CE, 1996). Nowadays, domino effects are an important part of Seveso infrastructure issues.

SEVESO Directive requires member States and companies to identify the risks linked to industrial activities and to develop measures to minimize those risks (European Commission, 1996). In France, installations concerned by this Directive are called ICPE (Classified Installations for Environment Protection). A nomenclature of these

infrastructures exists, classified according to activity sector, quantity and nature of substances used and produced on the site (Installations Classées, 2003).

Furthermore, an infrastructure concerned by the SEVESO Directive can also be a critical infrastructure. Protection of Critical Infrastructure and SEVESO Directive are established respectively to reduce potential consequences of a loss of resource and the destruction of the infrastructure.

2.2 Risk assessment methodologies for infrastructure protection

The aim of this part is to describe the features of risk assessment methodologies for infrastructure protection. Studies are mainly about the critical infrastructures. Several state-of-the-art reviews are produced (Giannopoulos et al., 2012) (Yusta et al., 2011) (Pederson et al., 2006). Authors emphasize the common points and difference between these methodologies. Sector infrastructure, audience and maturity level, type of interdependencies, identification of threats, modeling techniques are the most usual.

For instance, Yusta (2011) compiled a survey about methodologies and application for critical infrastructure with 55 references and discern this research with four features: types of critical infrastructures, modeling techniques, maturity and availability, risk management stages. This survey reveals two trends. The first one focused on the understanding of the structural and functional infrastructures. The second one concentrates on the representation of the dynamic behavior of the infrastructures. The article identifies five modeling techniques: multi-agent systems, system dynamics, rating matrices, relational data-bases and the network theory. Those modeling techniques are combined with computation methods and tools such as Monte Carlo simulation or geographic information system (GIS). Multi-agent and system dynamic are attractive because they can predict the behavior of critical infrastructure under emergencies situations. Network theory (e.g. Johansson and Hassel, 2010) and relational database enable to identify critical nodes. Rating matrices is also interesting because it uses semi-quantitative judgments.

Otherwise, we can find also methodologies that consider not exclusively critical. For instance, the Syner-G project "Systemic Seismic Vulnerability and Risk Analysis for Building, Lifelines Networks and Infrastructure Safety Gain" consists in the development of a methodology with three models: seismic hazard model, physical vulnerability model, functional and socio-economic system model (SYNER-G, 2012).

Regarding methodologies on the infrastructures concerned by the SEVESO European Directive, they deal with essentially of risk analysis on one industrial site and its environment (Tixier et al, 2002).

Finally, these methodologies are fundamentally oriented on the infrastructures (structural analysis, functional analysis and behavior analysis) and their interdependencies but without any spatial approach. Indeed, spatial approach allows studying infrastructures with the territory scale.

2.3 Synthesis

The part shows that the protection of the interdependencies between infrastructures is a recent subject. Seveso and critical infrastructures can generate domino effects because of the different types of interdependencies. Risk assessment methodologies for infrastructures protection are based mainly of the structure, the operation and the behavior of the interdependencies between infrastructures. Geographic approach has a little attention whereas it can deepen the risk analysis of these infrastructures.

Consequently, we created an innovative approach called Interdependencies between Industrial Infrastructures Approach (I3A) in a local context.

3. I3A Methodological approach

3.1 Research approach

In the state-of-art, we indicated that SEVESO regulations and critical infrastructures are distinct. Most of recent studies deals with interdependencies between infrastructures are about critical infrastructures. Although SEVESO infrastructures may be critical infrastructures; the state-of-the-art shows a need of improvement on that concern. Moreover, these infrastructures can generate several domino effects because of their interdependencies (e.g. functional, geographic) and cause many losses in a territory.

Our new approach is meant to provide a level of vulnerability for infrastructures and risk scenario in a local context.

3.2 Organization of the approach

I3A (Interdependencies between Industrial Infrastructures Approach) is based on four steps (Figure 2).

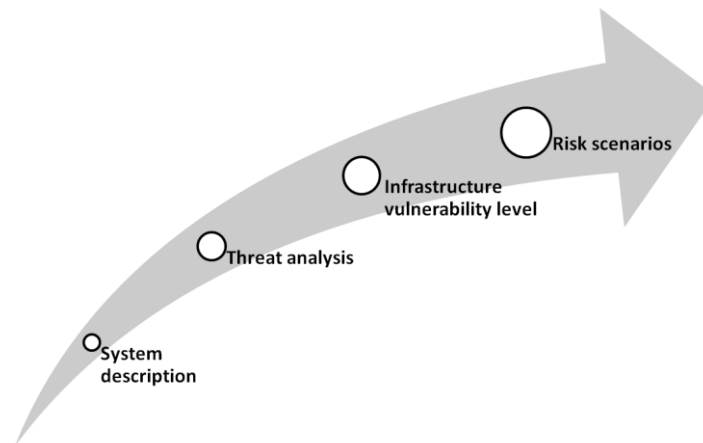


Figure 2: Methodological steps

- Step 1: System description

To develop the model, it remains essential to identify the system and their components. In our approach, the system is the territory composed by critical and SEVESO infrastructures. The methodology can have two scale levels: local and regional. Moreover, our tool can integrate several activities sector regarding the choice of critical infrastructures. Users of methodologies have to choose into the following list: energy, water, transport, industries. SEVESO infrastructures are considered in the list.

- Step 2: Threats Analysis

Several threats can impact infrastructures in a territory. The origin of the threat can be caused by man-made acts (e.g.: terrorism), industrial accident (e.g. fire), natural disaster (e.g. flood, earthquake). The aim of this step is to identify the different threats that we can find on a territory composed by several infrastructures interdependencies.

- Step 3: Infrastructure vulnerability level

In this step, we want to assess the infrastructure vulnerability level (Figure 3). The goal is to identify several criteria family according to physic, functional, economic, social and environment context of the infrastructure in the territory. It's also necessary to identify a threat (e.g. flood) to examine these criteria family which depend on:

- Importance of the infrastructure to the territory (e.g. economic potential);
- Intrinsic parameters of the infrastructure (e.g. accessibility);
- Interdependencies of the infrastructure (e.g. functional)
- Resiliency, prevention, protection measures (e.g. repetition)

Then, it is possible to specify the criteria family in several criteria (e.g. number of functional connections).

A multi-criteria analysis by expert judgment is going to classify the different dimensions (e.g. physic, functional) of the context, criteria family and criteria in order to have the infrastructure vulnerability level. It's possible to compare the levels to class the infrastructures.

- Step 4: Introduction of risk scenarios

Last step of this approach is to create risk scenarios and compare these scenarios with a consequences approach in a territory (Figure 4). In first time, it's necessary to describe a scenario with a choice of threat and elements of the system which are related to this step. With this description, several input data (e.g. element locating) are selected for application of different tools. Five tools are provided to assess the consequences in a territory:

- Tool 1, simulation of phenomena accidental can visualize a dangerous product if an element is impacted. For example, Garbolino (2010) uses PHAST software to simulate the consequences of failure in an industrial site (e.g. dispersion of a toxic cloud).
- Tool 2, real distance matrix and effect distances matrix enable to know if one or several elements are destroyed. Effect distances matrix are built for each type of event (e.g. Bleve). Reniers (2006) uses these tools in a methodology to reduce domino effects in a chemical installation.
- Tool 3, map of population density is created in order to be coupled into the tool 1 and 2. The goal is to assess the consequences of the social dimension (e.g. number of person who is intoxicated).
- Tool 4, inoperability input-output matrix is used to quantify the impact of the scenario on the operational capabilities of the activities sectors. Setola (2009) apply this tool to analyze the cascade effects between the critical infrastructure sectors with interviewing experts and fuzzy number.
- Tool 5, economic multipliers have to give a translation between the different consequences of the others dimensions to obtain their financial costs.

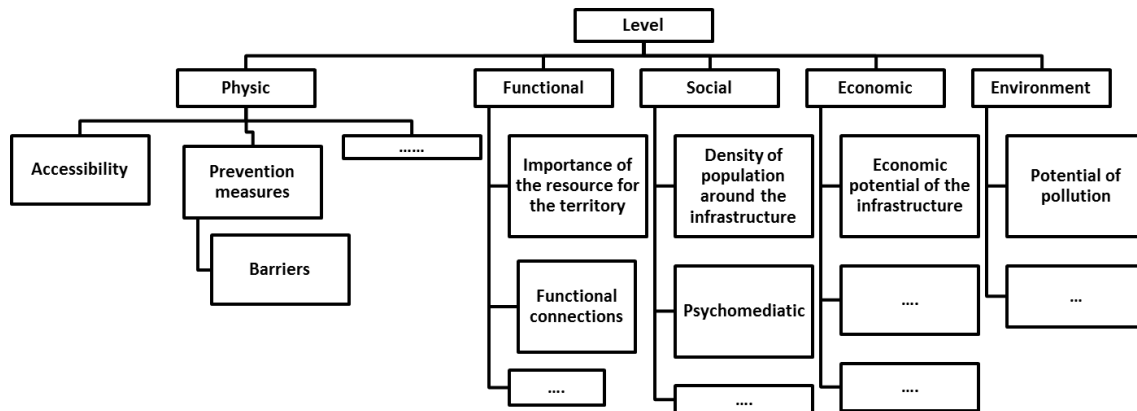


Figure 3: Infrastructure vulnerability level

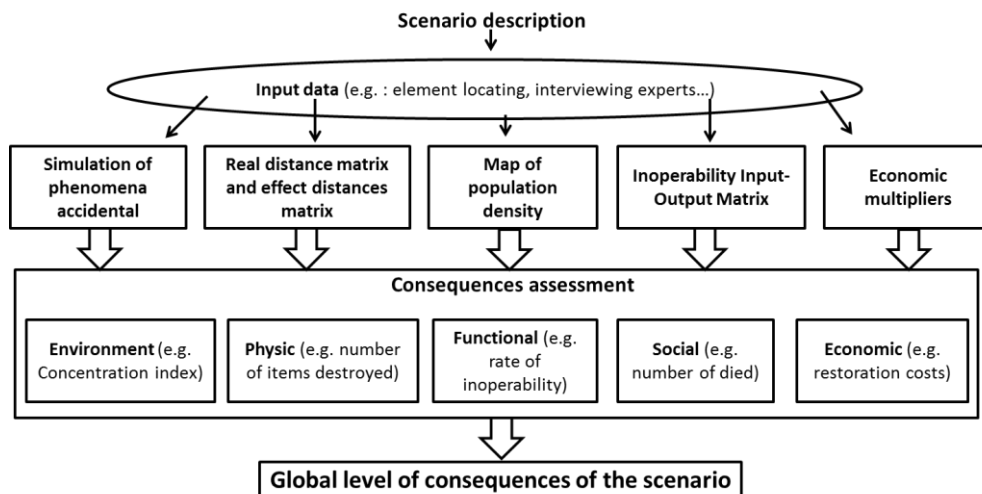


Figure 4: Framework of risk scenario assessment

4. Conclusion

The article produces a state-of-the-art based on mainly on the risk assessment for critical infrastructure protection. In a second time, the different steps of the new approach are given in order to develop an infrastructure vulnerability level and risk scenario in a local context. The different scenarios observe the consequences of a threat in a territory. The I3A (Interdependencies between Industrial Infrastructures Approach) developed in this article provides a framework of the project. The different steps must be developed and applied to add an innovative contribution in a local context of this current problematic.

Reference

- Bouchon S., 2011, Critical infrastructure identification: reflection with the European example, Geography thesis, University of Paris Ouest Nanterre La Défense, Gecko Laboratory, France (in French).
- COM (2004) 702 final, 2004, Communication from the commission to the council and the European parliament "Critical Infrastructure Protection in the fight against terrorism", Brussels, Belgium.
- COM (2006) 786 final, 2006, Communication from the commission on a European Programme for Critical Infrastructure Protection, Brussels, Belgium.
- Council Directive 2008/114/CE, 2008, The identification and designation of European critical infrastructures and the assessment of the need to improve their protection, Official Journal of the European Union.

- Council Directive 96/82/CE, 1996, The control of major accident hazards involving dangerous substances, Official Journal of the European Union.
- European Commission (EC), 1996, <www.ec.europa.eu/environment/seveso/index.htm> accessed 23.08.2012
- Garbolino E., Chéry J.P., Guarnieri F., 2010, Dynamic model of risk industrial systems, Lavoisier Edition, France (in French)
- Giannopoulos G., Filippini R., Schimmer M., 2012, Risk assessment methodologies for Critical Infrastructure Protection. Part I: State of the art, Publications Office of the European Union, Luxembourg, doi: 10.2788/22260
- Installations classées (IC), 2003, <www.installationsclassees.developpement-durable.gouv.fr/> accessed 23.08.2012
- Johansson J., Hassel H., 2010, An approach for modelling interdependent infrastructures in the context of vulnerability analysis, Reliability Engineering and System Safety, 95, 1335-1344, doi:10.1016/j.ress.2010.06.010
- Pederson P., Dudenhoefter D., Hartley S., Permann M., 2006, Critical Infrastructure Interdependency Modeling: A Survey of Critical Infrastructure Interdependency Modeling, Idaho National Laboratory, United-States of America.
- Pitrat D., 2011, Impacts of Tohoku earthquake on Japanese industry, Face au risque n°474 juin-juillet 2011, 28-31, France (in French).
- President's Commission on Critical Infrastructure Protection, 1997, The Report of Critical Foudation Protecting America's Foundation, USA.
- Reniers G.L.L., Dullaert W., DomPrePlanning: User-friendly software for planning domino effects prevention, Safety science, doi:10.1016/j.ssci.2006.10.004
- Rinaldi S. M., Peerenboom J. P., Kelly T. K., 2001, Identifying Understanding and Analyzing, IEEE Control Systems Magazine, 11-25.
- Robert B., Morabito L., 2011, Reducing vulnerability of critical infrastructure-Methodological Manual, Presses Internationales Polytechniques, Montreal, Canada.
- Setola R., De Porcellinis S., Sforza M., 2009, Critical infrastructure dependency assessment using the input-output inoperability model, International journal of critical infrastructure protection, doi:10.1016/j.ijcip.2009.09.002
- SYNER-G, 2012, Systemic Seismic Vulnerability and Risk Analysis for Buildings, Lifeline Networks and Infrastructures Safety Gain, <www.vce.at/SYNER-G/> accessed 27.08.2012
- Tixier J., Dusserre G., Salvi O., Gaston D., 2002, Review of 62 risk analysis methodologies of industrial plants, Journal of loss prevention in the process industries.
- Yusta J. M., Correa G.J., Lacal-Arántegui R., 2011, Methodologies and applications for critical infrastructure protection: State-of-the-art, Energy Policy, 39, 6100-6119 doi:10.1016/j.enpol.2011.07.010

Annexe 4

Activité essentielle « Gestion de l'eau »

Organisation de la gestion de l'eau en France, les services municipaux de l'eau potable et de l'assainissement

Les communes assurent la responsabilité de l'organisation des services publics de l'eau potable et de l'assainissement depuis 1885 (OIE, 2009). Pour 36 783 communes, il y a 29 000 services des eaux : 12 400 pour la distribution de l'eau potable et 16 700 pour l'assainissement (IFEN-SCEES 2007 cité dans OIE, 2009). Ces services à caractère industriel et commercial recouvrent pour le service de distribution d'eau potable le captage, le traitement, la distribution de l'eau, la gestion de la clientèle (BIPE/FP2E, 2012). Pour le service d'assainissement des eaux usées (collectif ou non), il s'agit de la collecte, la dépollution, le rejet des eaux usées, l'élimination des déchets, la gestion de la clientèle et des raccordements (BIPE/FP2E, 2012).

Ces services s'organisent par commune ou par groupe de communes (intercommunalité). Peu importe l'organisation choisie, la gestion des services est assurée selon un des trois modes suivants (OIE, 2009) :

- **La gestion directe ou régie**, la commune assure la responsabilité complète des investissements et du fonctionnement des services des eaux ainsi que des relations avec les usagers ;
- **La gestion déléguée**, une entreprise publique ou privée réalise le service d'eau. Deux types de contrats existent, l'affermage (uniquement exploitation des ouvrages) ou la concession (construction et exploitation des ouvrages) ;
- **La gestion mixte**, par exemple, la collectivité peut exploiter seulement les ouvrages de production d'eau potable et déléguer seulement la distribution.

Par ailleurs, le service d'assainissement des eaux usées est réalisé selon un des deux modes d'organisation suivant : l'assainissement collectif (majoritaire) ou non collectif (BIPE/FP2E, 2012). D'autre part, aujourd'hui, les entreprises de l'eau gèrent plus de deux tiers des services d'eau potable et plus de la moitié des services d'assainissement (FP2E/BIPE, 2012). Les principaux opérateurs sont (BIPE/FP2E, 2012) : E2S (Siagnole), Lyonnaise des Eaux, Nantaise des Eaux Services, Saur, Société de Fin d'Oise, Sogedo et Veolia Eau.

L'Etat joue un rôle de régulateur en fixant les règles générales et en assurant la solidarité (normes environnementales et de santé publique, contrôle de la qualité d'eau potable distribuée, exerce la police de l'eau, encadrement des relations de partenariat public-privé,...). Les agences de l'eau sont les principaux acteurs financiers pour aider les collectivités à protéger la ressource en eau et lutter contre les pollutions. Le contrôle sanitaire de l'eau potable est réalisé par les Agences Régionales de Santé (ARS) (FP2E/BIPE, 2012). Les prélèvements et les analyses du contrôle sanitaire des eaux sont assurés par des laboratoires agréés par le Ministère de la Santé. Ce sont 54 paramètres

bactériologiques et physico-chimiques qui doivent être respectés selon la législation (SEDIF, 2013), recouvrant à la fois :

- la composition physico-chimique en éléments minéraux (exemple : le calcium ou le magnésium,...)
- les caractéristiques liées à notre perception sensorielle (exemple : couleur, odeur,...) ;
- les substances indésirables (exemple : nitrates, pesticides,...) ;
- les paramètres microbiologiques.

L'ensemble des acteurs de contrôle et de finance sont représentés sur le schéma ci-dessous (Figure 92).

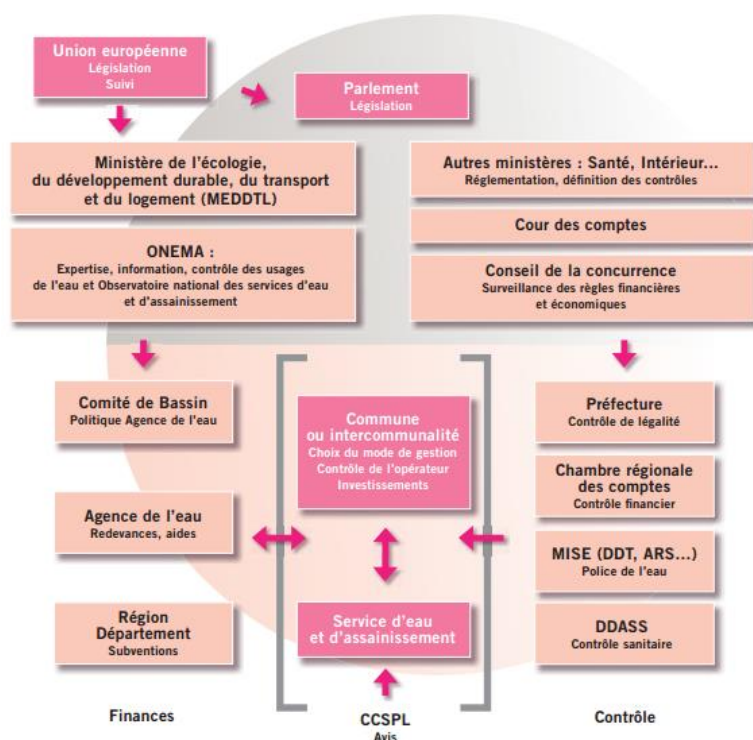


Figure 92 : Acteurs financiers et contrôle pour les services de l'eau (BIPE/FP2E, 2012)

Enfin, les approvisionnements d'urgence en eau potable font partie des dispositions générales du plan ORSEC. Celui-ci définit la mobilisation, la mise en œuvre et la coordination des actions de toutes personnes publiques et privées concourant à la protection générale des populations. La loi de modernisation de la sécurité civile du 13 août 2004 impose dans l'article 6 de maîtriser le risque de coupures d'eau et de satisfaire aux besoins prioritaires en situation de crise, grâce à des mesures nécessaires. Les opérateurs des services de l'eau sont donc soumis à ces engagements. Pour faire face à des situations d'urgence, les opérateurs sont équipés de système d'information ou système de supervision. Par exemple, la Lyonnaise des eaux est équipée du système d'information MAGES qui « permet de réguler 24h/24 le réseau d'assainissement de l'agglomération parisienne » et du système de supervision RAMSES assurant « la qualité du service en luttant contre les inondations liées aux débordements de réseau et en gérant, en temps réel, le système d'assainissement » (Lyonnaise des eaux, 2012). De plus, si la crise survient, une organisation d'ordre technique et de communication est disponible à partir des astreintes au niveau régional ou national (cas de la Lyonnaise des eaux, 2012). La mutualisation des moyens humains et matériels des centres est également possible,

surtout en cas de phénomène climatique étendu (cas de la Lyonnaise des eaux, 2012). La communication de crise est assurée en interne avec la cellule de crise de chaque centre et en externe afin d'informer les usagers et médias (cas de la Lyonnaise des eaux, 2012).

Le cycle des services d'eau et d'assainissement

Sept grandes étapes sont identifiées pour le cycle des services d'eau et d'assainissement (d'après VEOLIA, 2013 ; SAUR, 2013) (Figure 93).

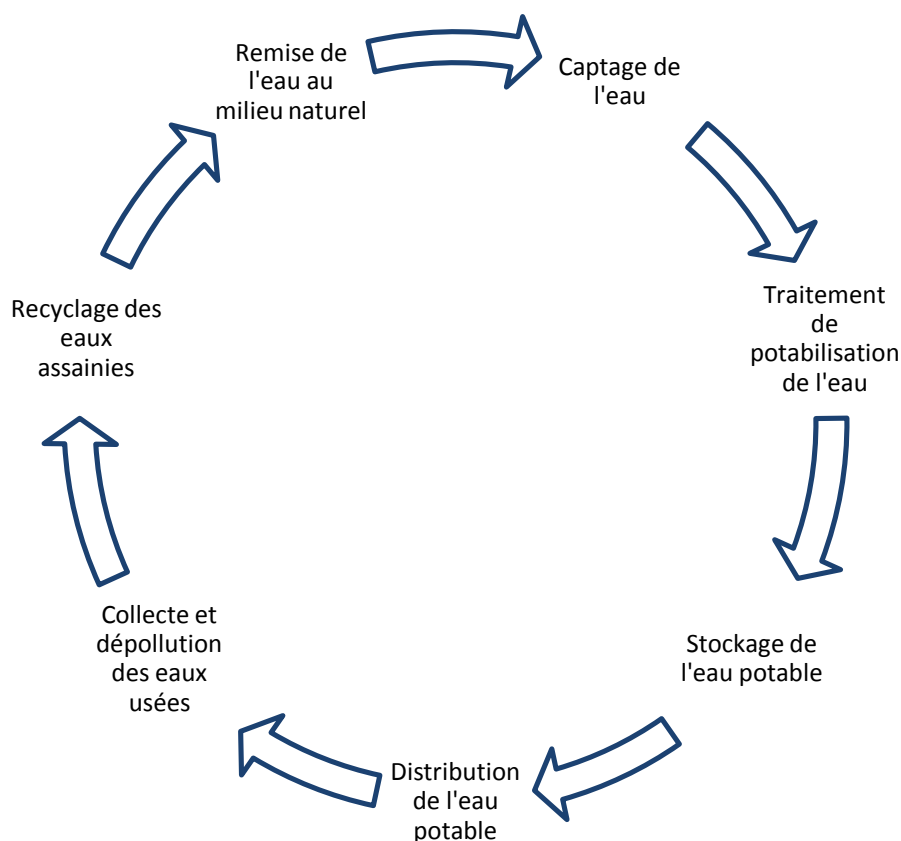


Figure 93 : Cycle des services de l'eau potable et d'assainissement

➤ **Captage d'eau du milieu naturel**

L'eau captée est d'origine artificielle (lacs, rivières, mers,...) ou naturelle (nappes phréatiques). Elle est pompée (par forages) ou directement prélevée en surface les stations de captage. Une station d'alerte située en amont du pompage contrôle également la qualité de l'eau prélevée. D'autre part, les usines d'eau potable peuvent se situer à proximité de cours d'eau donc les pompes peuvent être comprises à l'intérieur de ces points (exemple des usines du SEDIF) (SEDIF, 2013). La France compte près de 34 000 ouvrages de prélèvement : 96 % sont des captages d'eau souterraine (fournissent les 2/3 du volume d'eau pour la production d'eau potable), 4 % restants sont des prises d'eau superficielles. Par ailleurs, la France dénombre 5 ouvrages d'une capacité de plus de 25 000 m³/j de prélèvement de l'eau de mer pour produire de l'eau potable (BIPE/FP2E, 2012).

Ces zones de captages sont protégées par deux mesures distinctes mais complémentaires (BIPE/FP2E, 2012) :

- Périmètre de protection de captage (obligatoire) ;
- Zone de protection de l'aire d'alimentation de captage.

Un guide d'évaluation de la vulnérabilité des systèmes d'alimentation en eau potable est

publié en 2007 par le Ministère de la Santé et des solidarités (MSS,2007).

➤ **Traiter l'eau pour la rendre potable**

Plusieurs étapes sont nécessaires au traitement de l'eau (Veolia, 2013 ; Saur, 2013 ; Sedif, 2013) :

- ⇒ Dégrillage et tamisage : retirer les plus gros déchets dans un premier temps, puis à l'aide de tamis les déchets les plus fins sont retirés ;
- ⇒ Flocculation et décantation : Rassembler les déchets restant à partir d'un coagulant et récupération de ces déchets dans un bassin de décantation ;
- ⇒ Filtration sur sable : la filtration sur sable élimine les matières visibles encore à l'œil nu ;
- ⇒ Ozonation qui permet la désinfection de l'eau (ozone est un gaz qui casse les molécules d'eau) ;
- ⇒ Filtration sur charbon actif : les filtres à charbon actif retiennent les micropolluants comme les pesticides et consomment une partie de la matière organique cassée par l'ozone ;
- ⇒ Chloration : Ajout de chlore afin d'éviter le développement de bactéries et maintenir la qualité de l'eau

D'autres types d'usines existent pour le traitement de l'eau potable. Les usines à puits sont des forages utilisées par le SEDIF (Syndicat des Eaux D'Ile de France) pour assurer la sécurisation de son approvisionnement en eau potable en cas d'évènement exceptionnel par son ampleur et sa nature. Ces usines assurent captage puis traitement de l'eau et sont reliés au réseau (Sedif, 2013). Les usines de dessalement de l'eau de mer sont des solutions alternatives au traitement de l'eau, cette étape utilise deux principales technologies (Veolia, 2013) :

- Dessalement thermique : distillation ;
- Dessalement membranaire : osmose inverse.

➤ **Stockage de l'eau**

Après le traitement ou le dessalement, l'eau est transportée par un réseau de conduites fermées en fonte ou en acier. Ces réservoirs possèdent plusieurs missions (Sedif, 2013) :

- Garantir la production continue ;
- Mettre en pression les réseaux ;
- Maintenir une réserve immédiate pour satisfaire les pics de consommation périodiques et les besoins d'urgence.

➤ **Distribution de l'eau**

L'eau est distribuée à partir d'un réseau de conduites dotées de vannes et d'appareils de régulation. La pression, le débit, le niveau des réservoirs et la qualité de l'eau sont contrôlés sur plusieurs points réseaux (Veolia, 2013). Les canalisations assurent la distribution de l'eau. Le Sedif (2013) distingue deux types de canalisations. Les canalisations du réseau primaire assurent le transport entre les usines de production d'eau potable et les réservoirs d'eau potable (canalisations supérieures à 300 mm). Les canalisations du réseau secondaire (canalisations inférieures à 300 mm) assurent la distribution entre les réservoirs et les clients (particuliers, industriels).

Par ailleurs, le Sedif (2013) présente d'autres installations sur son réseau de distribution que les canalisations:

- Stations de pompage qui permettent d'élever l'eau ;

- Stations de surpression qui permettent d'augmenter la pression dans les canalisations ;
- Stations de transfert qui échangent de l'eau traitée entre les secteurs géographiques du réseau afin de le sécuriser
- Stations de chloration

➤ **Collecte et dépollution des eaux usées**

Plusieurs étapes sont nécessaires à l'assainissement des eaux usées (Veolia, 2013 ; Saur, 2013) :

- ⇒ **La collecte** s'effectue à partir d'un réseau d'assainissement ; le réseau est constitué de canalisations en ciment, béton ou PVC ;
- ⇒ **Dégrillage** pour enlever les plus gros déchets ;
- ⇒ **Dessablage** (= le sable et gravier se déposent au fond) et **déshuilage** (=injection d'air pour faire remonter les graisses en surface) ;
- ⇒ **Décantation** : MES se déposent au fond ; l'ajout de réactifs chimiques peut augmenter l'efficacité de la décantation ;
- ⇒ **Traitement biologique** qui consiste à faire dégrader les matières organiques dissoutes dans l'eau par des micro-organismes. Formation de boues biologiques.
- ⇒ **Le traitement des boues** des eaux usées entraîne une forte odeur en phosphate et azote. Ces boues sont alors valoriser dans différentes filières comme l'agriculture ou les industries (Veolia, 2013).
- ⇒ **Recyclage des eaux assainies (Veolia, 2013)**
L'eau recyclée peut utiliser des secteurs qui ne réclament pas de l'eau de qualité potable comme : agriculture, industries,...
Les eaux usées recyclées peuvent également fournir les eaux des nappes phréatiques ;

➤ **Rendre une eau saine au milieu naturel**

L'eau après son traitement ou recyclage est restituée au milieu naturel (Veolia, 2013).

Par ailleurs, les entreprises ou régies disposent de lieux stratégiques de surveillance qui centralisent l'ensemble des données des capteurs disposés sur l'ensemble des installations (exemple : centres de pilotage opérationnel du groupe SAUR). Ces centres collectent toutes les informations en temps réel des capteurs disposés sur le réseau.

Bibliographie

- BIPE/FP2E, 2012, Les services publics d'eau et d'assainissement en France – Données économiques, sociales et environnementales, Rapport Cinquième édition
- Ministère de la santé et des solidarités, 2007, Les systèmes d'alimentation en eau potable – Evaluer leur vulnérabilité, Guide Technique
- Ministère des Affaires sociales et de la santé, 2013, site internet www.sante.gouv.fr dernier accès 02/08/2013
- Office International de l'Eau, 2009, Organisation de la gestion de l'eau en France
- SAUR, 2013, Le centre de pilotage opérationnel – l'intelligence au service de l'eau
- SEDIF, 2013, site internet www.sedif.com dernier accès le 23/09/2013
- SUEZ environnement/Lyonnaise des Eaux, 2012, Les cahiers eau service, supplément technique – Assurer la continuité du service 24h/24 face aux aléas climatiques
- VEOLIA Eau, 2013, Protéger et gérer la ressource en eau

Annexe 5

Activité essentielle « santé »

Les institutions du système de santé Français

Les activités de santé en France sont organisées et coordonnées de manières complexes car il existe une multiplicité d'autorités administratives (Hopital, 2013). Parmi elles, on dénombre :

- **Les institutions nationales**

- Le ministère de la santé
- La direction générale de la santé : Elaboration et mise en œuvre de la politique relative à la prévention, à l'environnement sanitaire, à la maternité, à l'enfance et aux actions spécifiques de santé, à la gestion des risques sanitaires, ainsi qu'à l'organisation et à la formation des professions médicales et paramédicales ;
- La direction générale de l'offre de soins : Programmation de l'offre de soins et des investissements hospitaliers, de la gestion des statuts et de la formation des personnels hospitaliers, ainsi que de l'organisation des établissements hospitaliers ;
- La direction générale de l'action sociale : Mise en œuvre des politiques d'action sociale en direction des personnes ou des groupes en difficulté sociale, des enfants et des adultes handicapés, des personnes âgées ainsi que des familles, des enfants et des adolescents ;
- L'inspection générale des affaires sociales : Mission de contrôle et d'évaluation de la mise en œuvre de l'ensemble des politiques publiques dans les domaines de la santé, de la protection et de l'action sociale, du travail, de l'emploi et de la formation professionnelle ; Contrôle de tous les services, établissements ou institutions qui interviennent dans le champ des affaires sociales ;
- La Haute Autorité de Santé (HAS) : Evaluation de l'utilité médicale de l'ensemble des actes, prestations et produits de santé pris en charge par l'assurance maladie, de mettre en œuvre la certification des établissements de santé et de promouvoir les bonnes pratiques et le bon usage des soins auprès des professionnels de santé et du grand public
- L'Agence nationale de l'évaluation et de la qualité des établissements et services sociaux (ANESM) : Etablissement des référentiels de qualité pour les professionnels et évaluation des prestations offertes dans les établissements sociaux et médico-sociaux

- **Institutions décentralisées :**

- **Agences Régionales de Santé (ARS)** : en charge de la déclinaison et de la mise en œuvre régionale de la politique nationale de santé, de la définition d'une politique régionale de santé, de l'organisation des soins, de la veille et de la sécurité sanitaire, ainsi que de la prévention dans leur région
 - **Les départements via les conseils généraux** : En charge de l'aide et l'action sociale en faveur des personnes âgées (APA), l'aide et l'action sociale en faveur des adultes handicapés, l'aide sociale à l'enfance (ASE), la protection maternelle et infantile (PMI), la lutte contre l'exclusion (RSA, fonds d'aide aux jeunes...)
- **L'Assurance Maladie ;**

• **Les agences et instituts**

Plusieurs agences et instituts sont chargés de la **sécurité sanitaire** afin de prévenir, détecter les phénomènes ou les accidents pouvant influencer sur la santé des populations : l'Institut de veille sanitaire (InVS), L'Agence nationale de sécurité du médicament et des produits de santé (ANSM), Agence de sécurité sanitaire de l'environnement et du travail (Afsset), Agence française de sécurité sanitaire des aliments (Afssa), Institut de radioprotection et sûreté nucléaire, Comité national de la sécurité sanitaire, Commission nationale de matériovigilance. Il faut noter que L'InVS dispose de Cellules interrégionales d'épidémiologie (Cire), qui relaient son action au niveau régional. Elles sont placées sous la responsabilité scientifique de la directrice générale de l'InVS. Elles sont également sous la responsabilité des Agences régionales de santé (ARS) et participent à la plateforme régionale de veille et d'urgences sanitaires. Leur rôle se situe dans l'évaluation des signaux en s'appuyant sur des outils d'investigation et d'analyse des risques. L'InVS compte 17 Cire, dont 15 métropolitaines et 2 ultramarines. D'autres agences ou instituts sont présents en France et sont chargés de la prévention (Exemple : Institut National de prévention et d'éducation pour la santé (INPES)), le cancer, l'éthique et les dons.

▪ **L'Etablissement Français du Sang (Efs)**

L'EFS a pour mission première de service public « d'assurer l'autosuffisance de la France en produits sanguins dans des conditions de sécurité et de qualité optimales » (EFS, 2013). L'EFS gère d'une part « les activités de collecte, de préparation, de quantification, et de distribution des produits sanguins labiles » (fourniture de plus de 1900 établissements : hôpitaux et cliniques partout en France) et assure « l'approvisionnement en plasma du Laboratoire français du Fractionnement et des Biotechnologies (LFB) qui fabrique les médicaments dérivés du sang » (EFS, 2013). L'EFS est implanté sur le territoire national grâce à 17 établissements régionaux.

Les établissements de santé en France

Les établissements de santé français sont à caractère public et à caractère privé (65 % des lits en secteur public et 35 % en secteur privé) (Hôpital, 2013). Le secteur public hospitalier regroupe les établissements publics relevant des domaines sanitaire, social et médico-social (hôpitaux, centres hospitaliers spécialisés, maisons de retraite, maison d'accueil spécialisé...) ». Les différents types d'hôpitaux publics sont (Hôpital, 2013) :

- **Centres Hospitaliers Régionaux Universitaires (CHRU)**, qui ont une vocation régionale liée à leur haute spécialisation. Les CHRU cumulent deux fonctions :

- Effectuer les soins courants vis-à-vis de la population et de leur secteur ;
- Fonction d'appel et de soins de second degré vis-à-vis des autres établissements de santé

Il existe 30 CHRU en France (DOM-TOM inclus) et assurent 35 % de l'activité des hôpitaux publics français.

- **Centres Hospitaliers (CH)** qui « ont pour mission d'offrir des services diagnostiques et d'assumer toute la gamme des soins aigus en médecine, chirurgie et obstétrique, ainsi que les soins de suite et de longue durée » ;
- **Centres hospitaliers spécialisés en psychiatrie qui assurent** « la prise en charge des patients en matière de santé mentale » ;
- **Hôpitaux d'Instruction des Armées (HIA)**

Les établissements de santé privés sont distingués en trois types :

- **Etablissements de santé privés d'intérêt collectif (ESPIC)**. Ils sont au nombre de 782 en France (Hôpital, 2013) ;
- **Les centres de lutte contre le cancer** sont aussi des établissements de santé privés à but non lucratif et possèdent trois missions : les soins, la recherche et l'enseignement ;
- **Les établissements à but lucratif** (les cliniques) et sont au nombre de 1442 et comptent 93 812 lits (Hôpital, 2013).

Par ailleurs, les établissements de santé élaborent des plans blancs. Ces plans sont destinés à faire face à une situation exceptionnelle ou à organiser l'accueil hospitalier d'un grand nombre de victimes (concerne les établissements de santé publics ou privés). Ce plan recense les moyens susceptibles d'être mobilisés et définit les conditions de leur emploi par les établissements qui se dotent également d'une cellule de crise opérationnelle. C'est le directeur du centre hospitalier qui déclenche le plan blanc. De plus, chaque plan blanc est intégré dans un plan blanc élargi au sein du département afin de définir le rôle et la place de chaque établissement en cas de situation exceptionnelle (Hôpital, 2013). D'autre part, un arrêté du 30 décembre 2005 relatif à la liste des établissements de santé de référence, désigne pour chaque zone de défense un ou plusieurs établissements de santé de référence pour les situations sanitaires exceptionnelles mentionnées à l'article L.3110-9. Ces établissements disposent d'un :

- Service d'aide médicale urgente ;
- Service d'accueil des urgences ;
- Service de maladies infectieuses doté de chambres d'isolement à pression négative ;
- Service de réanimation doté de chambres d'isolement ;
- Service de pédiatrie doté de chambres d'isolement ;
- Service de pédiatrie doté de chambres d'isolement à pression négative ;
- Service de médecine nucléaire ;
- Laboratoire d'un niveau de confinement L3 ;
- Aire permettant de poser un hélicoptère. »

Neuf établissements de santé de référence sont dénombrés en France métropolitaine. Ces établissements ont la responsabilité « de susciter la mise en œuvre d'actions de complémentarité, de réseaux et de promouvoir des actions au niveau des communautés d'établissements » afin de faire face au risque, notamment NRBC (Hôpital, 2013).

Les industries de santé

Les industries de santé sont des partenaires incontournables des Etats et des institutions

mondiales pour anticiper et apporter des réponses en matière de protection, de prévention, de diagnostic et de traitement (FEFIS, 2013). **Une carte nommée CARTEOFIS** indique les implantations des sites de production(s), de recherche ainsi que les sièges sociaux des industriels de santé membres de la FEFIS (Fédération Française des Industries de Santé). Cette fédération fédère aujourd'hui 11 syndicats (FEFIS, 2013).

D'autre part, le secteur des industries de santé est diversifié via **ses différents produits** (FEFIS, 2013) :

- **Les médicaments à usages humain et vétérinaire ;**
- **Les dispositifs médicaux** (pansement, un scanner,..), répartis en plusieurs catégories :
 - **Les dispositifs médicaux Implantables actifs** (stimulateurs cardiaques, pompes implantables,...) ;
 - **Les dispositifs médicaux fabriqués sur mesure** (fauteuils roulants,...) ;
 - **Les autres dispositifs médicaux** décomposés en trois groupes
 - **Implants chirurgicaux non actifs** (prothèses de hanche, les valves cardiaques,...) ;
 - **Les équipements** (défibrillateurs, pompes à perfusion,...) ;
 - **Les consommables** (les aiguilles, lentilles de contact,...).
 - **Les accessoires des dispositifs médicaux** (produits d'entretien de lentilles de contact sans revendication d'action thérapeutique,...) ;

Après production de ces produits, ils sont répartis via :

- **Les grossistes répartiteurs qui** occupent une place stratégique puisqu'ils font l'interface entre les laboratoires et les pharmacies d'officine. Ils « achètent les médicaments aux laboratoires, les stockent dans leurs établissements puis les livrent et les mettent à disposition des officines de pharmacies » (Fefis, 2013). En France, on dénombre 7 entreprises de répartition possédant 183 établissements de distribution en gros de médicaments (Fefis, 2013).
- **Les logisticiens dépositaires pharmaceutiques** qui assurent pour le compte des laboratoires le stockage et la distribution des médicaments et des dispositifs médicaux. Ces logisticiens mettent à disposition des produits de santé auprès des distributeurs : grossistes répartiteurs, les dépositaires secondaires, les groupements de pharmaciens, les pharmacies d'officine directement, les établissements de santé (Fefis, 2013).

Le plan de « Pandémie Grippale » (d'après SGDSN, 2011)

Suite à l'épisode pandémique en 2009, le plan a été réformé. Celui-ci décrit la stratégie de réponse de l'Etat et concerne l'ensemble des collectivités publiques, des professionnels de santé et des acteurs socio-économiques. Le risque de pandémie de grippe est toujours présent. « Outre son impact sanitaire, une pandémie grippale peut provoquer une désorganisation du système de santé, mais aussi des perturbations importantes de la vie sociale et économique. La réponse relève donc d'une approche non seulement sanitaire mais intersectorielle ». Face à cela, le plan national de « pandémie grippale » a pour objectifs de protéger la population et préserver le fonctionnement de la société et des activités économiques avant, pendant, après l'épidémie. De plus, ce plan national s'inscrit

dans un dispositif de planification avec d'autres outils d'aide à la décision :

- « un ensemble de fiches décrivant le mode opératoire des mesures de réponse, avec leur gradation en fonction de l'impact de la pandémie,
- un guide de déclinaison territoriale,
- un guide d'aide à l'organisation d'une campagne de vaccination exceptionnelle et un guide de distribution des produits de santé, destinés aux échelons territoriaux,
- un guide d'élaboration des plans de continuité d'activité, pour les administrations, collectivités et entreprises. »

Les principales tâches de préparation sont listées avec leurs acteurs selon différentes catégories :

- **Organisation et planification ;**
- **Continuité d'activités**, dans cette catégorie on retrouve la préparation des opérateurs d'importance vitale à la situation de pandémie (suivi par le SGDSN et les ministères de tutelle) ;
- **Préparation du dispositif de santé** qui contient notamment l'organisation des laboratoires de diagnostic de la grippe pour la détection des cas (suivi par le ministère de la Santé) et la préparation du schéma logistique de distribution des produits et équipements de santé (suivi par le Ministère de la Santé) ;
- **Vaccination ;**
- **Evaluation, recherche et développement** qui contient notamment la préparation de la mobilisation de la recherche en situation pandémique (Santé, Recherche) ;
- **Volet international.**

En situation de pandémie, l'organisation de la conduite de crise se fait au niveau gouvernemental et au niveau des autres échelons territoriaux inférieurs. « La chaîne territoriale des préfets constitue la colonne vertébrale de la préparation et de la conduite de crise ». En situation de crise, les préfets de zone et de département coordonnent l'organisation des soins en s'appuyant sur les ARS. De plus le préfet de département et le maire s'appuient sur le plan et les fiches-mesures pour limiter les risques de contagion et continuer les activités des services publics (ramassage des ordures, production d'eau, alimentation, traitements des eaux usées,...). La stratégie de réponse est plurisectorielle et possède deux dimensions :

- **Sanitaire ;**
- **Continuité de la vie du pays (vie sociale et économique – solidarité)** avec une attention particulière portée aux activités d'importance vitale et services essentiels et aux ressources humaines de la continuité sociale/économique du pays.

Le guide d'aide à la décision distingue :

- **1 fiche alerte initiale ;**
- **4 fiches correspondant aux 4 stades principaux d'épidémie** (freiner l'introduction du virus sur le territoire ; freiner la propagation du virus sur le territoire ; atténuer les effets de la vague épidémique ; revenir à la situation antérieure et se préparer à une vague suivante éventuelle) ;
- **2 fiches de mesures transverses** (vaccination et communication).

Parmi la fiche alerte initiale, les mesures suivantes sont distinguées :

- Evaluation et intégration des informations d'ordre sanitaire ;
- Organisation des laboratoires pour la détection des cas (concerne les laboratoires hospitaliers spécialisés en virologie moléculaire appliquée au virus influenza et de niveau de sécurité 3 coordonnées par les CNR)
- Sécurisation des établissements de production et de stockage des moyens de protection et produits de santé ;
- Acquisition et distribution des produits de santé ;

La fiche du stade 4 de l'épidémie « Atténuer les effets de la vague épidémique » compte de nombreuses mesures concernant le maintien des services essentiels et des Secteurs d'Activités d'Importance Vitale :

- **Liaisons gouvernementales**

Cette mesure a pour objectif d'encourager « les opérateurs de télécommunications à prendre les dispositions internes pour garantir les services à leurs clients étatiques » (au niveau central, zonal et départemental).

- **Défense**

Cette mesure définit les grandes lignes à prendre pour garantir la résilience du ministère de la défense lors d'une pandémie grippale.

- **Eau potable**

Cette mesure a pour objectif de « maintenir la production et de la distribution d'eau potable, ainsi que de la capacité des laboratoires d'analyses à contrôler la qualité des eaux potables et de loisirs ».

- **Modalités des mesures d'élimination des déchets ménagers**

Cette mesure a pour objectif d'assurer « la continuité du service public des déchets en phase de pandémie afin de permettre leur collecte et traitement, essentiels à la préservation de la salubrité publique ».

- **Gestion des déchets d'activités de soins à risques infectieux (DASRI)**

Cette mesure a pour objectif de prendre en charge les DASRI afin de les collecter, transporter, traiter et éliminer.

- **Energies, Communications électroniques, services financiers et bancaires, services postaux, mesures économiques, financières et douanières**

Cette mesure a pour objectif d'assurer le fonctionnement des secteurs, définir des mesures transverses et faire face à une situation difficile par des mesures de répartition.

- **Approvisionnement alimentaire et produits de première nécessité**

Cette mesure a deux objectifs : « maintenir les exploitations et les filières agroalimentaires à un niveau d'activité suffisant pour assurer leur pérennité et le ravitaillement alimentaire de la population » et « maintenir active la chaîne d'approvisionnement de produits essentiels en période de crise ».

- **Transport (route, air, fer, mer, fleuves)**

Cette mesure a pour objectif de « maintenir pendant la pandémie des services de transport au plus haut niveau d'activité possible et, a minima d'assurer les besoins prioritaires du pays ».

- **Maintien des activités essentielles de justice**

Cette mesure a pour objectif la continuité des « activités pénales essentielles au maintien de l'ordre, règlement des litiges en privilégiant les référés et le traitement des contentieux civils revêtant un caractère urgent ».

- **Maintien des industries pharmaceutiques, médicales et produits**

d'hygiène

Cette mesure a pour objectif que l'ensemble des acteurs de la chaîne de production et de distribution prennent les dispositions nécessaires pour garantir un approvisionnement suffisant des produits de santé pour faire face à la crise tout en maintenant la production des spécialités indispensables dont l'absence momentanée conduirait à une augmentation significative de la morbidité et/ou de la mortalité ». Les produits de santé concernés sont : les médicaments, les produits sanguins labiles, les produits d'origine humaine autres que le sang, les dispositifs médicaux et les produits/dispositifs d'environnement médical et d'hygiène.

- **Maintien des missions prioritaires de Météo France**

Cette mesure a pour objectif d'assurer les missions prioritaires de météo-France : sécurité météorologique des personnes et des biens vis-à-vis des risques météorologiques en métropole et outre-mer, sur terre et sur mer, l'assistance aux services concernés de l'Etat en ce qui concerne les risques technologiques, la satisfaction des besoins du ministère de la Défense, l'assistance à certaines activités économiques (Energie, transports, spatial en Guyane)

- **Plan de continuité des établissements de santé**

Cette mesure a pour objectif de définir les mesures de continuité à mettre en œuvre dans les établissements de santé.

I.5 Bibliographie

Etablissement Française du Sang, 2013, site internet <www.dondusang.net> dernier accès le 18/07/2013

Fédération Française des Industries de Santé (FEFIS), 2013, Les industries de santé
Fédération Française des Industries de Santé (FEFIS), 2013, site internet <www.fefis.fr> dernier accès le 17/07/2013

Hôpital, 2013, Site internet www.hopital.fr dernier accès le 17/07/2013

Les entreprises de la santé, pharmacie et cosmétique – FPS, 2013, site internet <www.fps-covrec.org/fr> dernier accès le 02/08/2013

Ministère des Affaires sociales et de la Santé, 2013, site internet <www.sante.gouv.fr> dernier accès le 17/07/2013

SGDSN, 2011, Plan national de Prévention et de lutte « Pandémie Grippale » - Document d'aide à la préparation et à la décision

Annexe 6

Activité essentielle « Activités civiles de l'Etat »

Résumé réalisé à partir du site internet <http://www.vie-publique.fr>

Rôle de l'administration

L'administration peut revêtir deux sens différents :

- **Sens fonctionnel**, dans ce cas l'administration « désigne l'ensemble des activités dont le but est de répondre aux besoins d'intérêt général de la population (ordre public, marché des services publics...), tels qu'ils sont définis à un moment donné par l'opinion publique et le pouvoir politique » ;
- **Sens physique/organique**, dans ce cas l'administration « désigne l'ensemble des personnes morales (Etat, collectivités territoriales, établissements publics...) et physiques (fonctionnaires, contractuels,...) qui accomplissent ces activités.

En France, il faut distinguer :

- **l'administration d'Etat** dont les compétences s'étendent à tout le territoire (selon la Constitution, le gouvernement dirige l'administration d'Etat) ;
- **l'administration territoriale** dont les pouvoirs sont limités à la région (dirigée par président du conseil régional), au **département (dirigée par le président du conseil général) ou à la commune (dirigée par le maire)** ;
- les **établissements publics** qui possèdent des compétences spécialisées.

L'administration a pour objectif de satisfaire l'intérêt général en assurant des services considérés comme utiles à la société et non rentables. **La fonction publique** (la fonction publique d'Etat, la fonction publique territoriale, la fonction publique hospitalière) est au service de l'administration et comprend l'ensemble des fonctionnaires. **Le service public** est une fonction clé de l'administration car il accomplit des activités d'intérêt général. L'expression « service public » désigne deux sens :

- « activités ou une mission d'intérêt général (ex : service public de l'Ecole, du ramassage des ordures) » ;
- « l'ensemble des organismes en charge de ces activités d'intérêt général et qui peuvent être aussi bien publics que privés (ex : les sociétés d'autoroutes) ».

D'autre part, selon la nature de l'activité et de la structure, on distingue :

- **Les services publics administratifs** qui n'ont pas de but industriel ou commercial. Ils sont gérés par des organismes publics et le droit administratif y est prédominant ;

- **Les services publics industriels et commerciaux** qui sont gérés par des organismes publics ou privés. « Lorsqu'il s'agit d'organismes privés, le droit privé s'y applique majoritairement, mais le droit administratif n'en est pas absent ». Ces organismes restent sous la tutelle des pouvoirs publics (Etat, collectivités territoriales).

Les fonctions principales de l'administration sont l'application de la loi, la police administrative et la gestion directe des services publics.

L'administration d'Etat (administration centrale et déconcentrée, les autorités administratives indépendantes)

Les autorités de l'administration d'Etat (président de la république, Premier ministre et les ministres) se partagent les pouvoirs administratifs.

L'administration centrale rassemble les services de chaque ministère à compétence nationale. Les services déconcentrés ont une compétence territoriale et assurent le relais au niveau local des décisions prises par l'administration centrale ». L'administration centrale est organisée selon plusieurs niveaux : les directions, les subdivisions qui peuvent être des sous-directions, des services ou des divisions. Les ministères disposent de services déconcentrés principalement au niveau départemental. Ces services sont placés sous la direction du préfet (sauf l'éducation nationale, justice, services fiscaux).

« Une autorité administrative indépendante (AAI) est une institution de l'Etat, chargée, en son nom, d'assurer la régulation de secteurs considérés comme essentiels et pour lesquels le gouvernement veut éviter d'intervenir trop directement ». Ces AAI sont des structures administratives mais ne font pas partie de la hiérarchie de l'administration. Elles disposent de nombreux pouvoirs de recommandation, décision, réglementation et de sanction. Deux catégories d'AAI existent :

- Autorités chargées de la régulation des activités économiques ;
- Autorités protégeant les droits des citoyens.

Parmi les AAI, il faut citer par exemple Autorité des marchés financiers ou encore l'Autorité de sûreté nucléaire.

Administration décentralisée

L'administration territoriale décentralisée (transfert de compétences de l'Etat aux collectivités locales) comprend les services des collectivités territoriales. Elles bénéficient d'une certaine autonomie et de leur propre budget sous la surveillance d'un représentant de l'Etat. Une collectivité territoriale est définie par trois critères :

- Dotée par une personnalité morale, ce qui lui permet d'agir en justice (autonomie administrative)
- Des compétences propres ;
- Un pouvoir de décision.

Il existe **différentes collectivités territoriales** définies par l'article 72 de la constitution : les communes, les départements, les régions (régions d'outre-mer comprises), les collectivités à statut particulier (exemple : la corse), les collectivités d'outre-mer. L'administration territoriale décentralisée est dirigée par :

- Le maire qui est le chef de l'administration communale. Le maire est à la fois un agent de la commune, en tant que collectivité territoriale, et un agent de l'Etat (le maire remplit des fonctions administratives : organisation d'élection).
- Le président du conseil général pour le département ;

- Le président du conseil régional pour la région ;

D'autres structures administratives existent comme les services à compétence nationale et les établissements publics.

Les services à compétence nationale qui se situent « à mi-chemin entre les administrations centrales et les administrations déconcentrées. » Ce sont des outils utilisés permettant d'assumer des missions de conception, d'animation et d'évaluation des politiques publiques. Les services à compétence nationale remplissent des fonctions de gestion, d'études techniques, des activités de production de biens ou de prestations de services. Il s'agit par exemple du service d'études techniques des routes et des autoroutes (SETRA).

Les établissements publics qui sont définies comme étant « une personne morale de droit public disposant d'une autonomie administrative et financière afin de remplir une mission d'intérêt général, précisément définie, sous le contrôle de la collectivité publique dont il dépend (Etat, région, département, commune) ». Les établissements publics sont soumis à trois principes :

- Autonomie : Personnalité morale, budget propre et organisation variable ;
- Rattachement à un niveau de l'administration : Etat, région, département, commune ;
- Spécialité.

Deux types d'établissement sont distingués selon la nature de leur activité : établissements publics administratifs (EPA) et établissements publics à caractère industriel et commercial (EPIC).

Annexe 7

Activités essentielles « Energie »

Le chemin de l'électricité et ses infrastructures

Trois grandes étapes se distinguent pour décrire le chemin de l'électricité (RTE, 2013) :

- **La production** qui provient essentiellement des centrales nucléaires, des usines hydrauliques et thermiques. L'opérateur Edf est le principal producteur d'électricité en France.
- **Le transport caractérisé par son :**
 - **Réseau 400000 volts.** Ce réseau transporte l'électricité sur de grandes distances (en minimisant les pertes). Ce réseau assure la solidarité entre les régions et la sécurité d'alimentation de tous (interconnexions avec les réseaux des pays voisins) ;
 - **Réseau d'alimentation régional.** Ce transport effectué à l'échelle régionale ou locale en 225 000, 90 000 et 63 000 volts. Il achemine l'électricité vers les grands consommateurs industriels et les réseaux de distribution ;
548 sites industriels sont directement connectés au réseau de transport d'électricité.
- **Le réseau de distribution** à l'aide du passage de l'électricité du réseau de transport au réseau de distribution par « les postes sources » (2350 postes sources répartis sur tout le territoire). « Ces échangeurs abaissent la haute et très haute tension en moyenne tension (15 000 ou 20 000 volts) ou en basse tension (380 et 220 volts). Les clients de ce réseau sont les particuliers, les petits commerçants, les collectivités locales et les petites et moyennes entreprises ».
La distribution est assurée par ERDF et 156 entreprises locales de distribution (ELD). La distribution de l'électricité est assurée par les communes soit sous un régime de gestion directe, soit sous un régime de la concession de service public. Dans le cas de ce dernier, ErDF assure environ 95 % de la distribution, en terme d'énergie facturée ou de populations concernées.

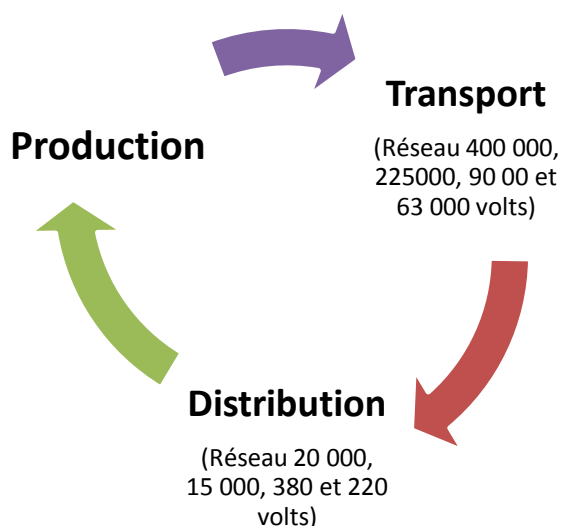


Figure : Chemin de l'électricité

Les infrastructures du chemin de l'électricité

Les infrastructures de production (Edf, 2013) comportent :

- Les centrales nucléaires avec en France 19 centrales comprenant 58 réacteurs. Ces centrales produisent différentes puissances avec ou sans aéroréfrigérant. On dénombre 6 types de centrales :
 - Centrale nucléaire de 900 MW sans aéroréfrigérant (18 unités) ;
 - Centrale nucléaire de 900 MW avec aéroréfrigérant de premier type (6 unités) ;
 - Centrale nucléaire de 900 MW sans aéroréfrigérant de second type (10 unités) ;
 - Centrale nucléaire de 1300 MW sans aéroréfrigérant (10 unités) ;
 - Centrale nucléaire de 1300 MW avec aéroréfrigérant (10 unités) ;
 - Centrale nucléaire de 1450 MW avec aéroréfrigérant (4 unités).
- Les centrales thermiques avec 15 sites de production thermique existant en France et une puissance installée de 12,2 GW. Deux types de centrales sont utilisés :
 - Centrales thermiques classiques (charbon/fioul) ;
 - Centrales à cycle combiné gaz (turbine à combustion et turbine à vapeur).

Les centrales qui utilisent du gaz naturel permettent de réduire les émissions atmosphériques par rapport aux moyens classiques (CO₂ divisé par 2, Oxydes d'azote NO_x divisé par 3, suppression des oxydes de soufre SO₂).

- Les centrales d'hydroélectricité qui représentent 10% de la production française. Différents types d'installations existent :
 - Centrale de haute chute (Hauteur de la chute >300 m). La centrale est éloignée du barrage et répond aux pointes de consommation ;
 - Centrale de moyenne chute (30m < H < 300m). La centrale est près ou loin du barrage. Ce type de centrale régule la production journalière ou hebdomadaire ;

- Centrale de basse chute ($H < 30\text{m}$).

Par ailleurs, les centrales peuvent être équipées de STEP (Stations de Transfert d'Énergie par Pompage) qui se composent de deux bassins en amont et en aval. Lors des périodes de faible consommation, l'eau est remontée par pompage de l'aval vers l'amont pour constituer un stock.

Les infrastructures de transport (RTE, 2013) comportent:

- Les lignes aériennes composées de câbles (par lesquels transite le courant électrique) portés par des pylônes.
- Les pylônes distingués en trois types :
 - Architecturés ;
 - Treillis ;
 - Monopoles ;
- Les isolateurs qui assurent l'isolement électrique entre les câbles conducteurs et les supports (la longueur augmente avec le niveau de tension, il faut compter environ 6 isolateurs en 63 000 volts, 9 en 90 000 volts, 12 en 225 000 volts et 19 en très haute tension de 400 000 volts).
- Les lignes souterraines
- Les postes électriques

Les postes électriques permettent d'adapter la tension en fonction des lignes et des réseaux, mais aussi à d'aiguiller l'électricité et à "surveiller" à distance sur les différentes lignes qu'elle emprunte.

Le transformateur qu'on trouve dans un poste, est un appareil destiné à modifier la tension électrique du courant. Il permet d'abaisser la tension, par échelons successifs (400 000, 225 000, 63 000, puis à 20 000 volts), en fonction de l'utilisateur final et de ses besoins en électricité. Il peut aussi permettre d'élever la tension, par exemple en sortie de centrale de production, de 20 000 à 400 000 volts, afin de rendre l'électricité transportable sur de longues distances, en limitant les pertes électriques (effet joule) ;

Les postes permettent de répartir le courant entre les lignes situées en amont et en aval du transformateur;

Surveillance et contrôle: Les postes hébergent des systèmes de surveillance et de contrôle du réseau dans des bâtiments de relayage. Ils permettent d'envoyer des informations vers des centres distants qui les analysent et détectent les éventuelles anomalies. Ces centres envoient en retour des ordres télécommandés (ouverture ou fermeture des disjoncteurs et sectionneurs) permettant de répartir le courant sur les différentes lignes ou corriger une anomalie sur le réseau. Les informations transitent sur différents supports de transmission : lignes électriques par la technique des courants porteurs en ligne, fibres optiques installées dans les câbles de garde ou le long des conducteurs électriques, liaisons filaires ou faisceaux hertziens.

Les postes électriques sont aussi composés de disjoncteur et de sectionneur. **Le disjoncteur** est « un appareil destiné à protéger les circuits et les installations contre une éventuelle surcharge de courant due à un court-circuit (provoqué par la foudre ou par un contact entre le conducteur et la terre). Il permet aussi l'exploitation du réseau en interrompant ou en rétablissant le passage du courant dans une portion du circuit ». **Le sectionneur** assure « une coupure visible du circuit électrique. Cette coupure certaine est primordiale car elle permet d'intervenir pour l'entretien ou la réparation des appareils en toute sécurité. En

mettant hors tension ou sous tension certains circuits du poste. Il assure la fonction d'aiguillage en répartissant les transits d'énergie entre les lignes électriques raccordées au poste. La commande du sectionneur peut être électrique ou manuelle ».

○ **Les postes sources**

Ces postes permettent de passer du transport d'électricité à la distribution et sont de trois types :

- « **Poste aérien** » implanté principalement en milieu rural. L'air est l'isolant et une distance importante est nécessaire entre les différentes parties sous-tensions ;
- « **Poste Intérieur Modulaire (PIM)** ». L'ensemble des installations se trouve en bâtiment et chaque appareillage électrique est isolé dans des compartiments ou modules ;
- « **Poste en bâtiments** » concerne les grandes agglomérations. La technique utilisée est sous enveloppe métallique (SEM) ;

Sécurité d'approvisionnement et SdF de l'électricité

Deux notions se distinguent pour la sécurité et sûreté de l'électricité (MEDDE, 2011) :

- La sécurité d'approvisionnement : « aptitude du parc de production à couvrir à tout moment, l'ensemble de la demande ». A ce titre La circulaire du 21 septembre 2006 précise les conditions dans lesquelles les établissements de santé bénéficient d'une priorité de leur alimentation en cas de délestages ; (prise en compte également des sites SEVESO) ;
- La sûreté de fonctionnement : « Capacité du système électrique à évacuer l'électricité des producteurs pour la délivrer aux consommateurs ». La politique de SdF est structurée en 2 volets : la prévention afin de limiter le risque d'occurrence d'une crise et la gestion de crise ;

Par ailleurs, afin de garantir la sécurité d'approvisionnement électrique lors des pointes de consommation, l'Etat Français pilote actuellement le dispositif de mécanisme de capacité entre les producteurs d'électricité, les fournisseurs d'électricité, les consommateurs et les opérateurs d'effacement (incitant les consommateurs à réduire leur consommation) (MEDDE, 2012).

Le chemin du pétrole

L'origine des importations de pétrole brut en France provient essentiellement de 4 régions du monde : Afrique (33%), Moyen-Orient (17%), Ex-CEI (33%) et l'Europe (16%). Les importations de produits pétroliers (Gazole, carburateurs, fiouls lourds,...) proviennent essentiellement de l'UE des 27 (40%), la Russie (29%) et l'Extrême et proche Orient (13%) (Source CPDP-UFIP, 2013). D'autre part, la France exploite et produit (=phase d'exploitation commerciale d'un gisement d'hydrocarbures) des hydrocarbures. Soixante-trois gisements de pétrole et douze gisements de gaz sont exploités en France (UFIP d'après les Données Bureau Exploration – Production des Hydrocarbures (BEPH), 2009). La production française de pétrole brut est assurée par 4 opérateurs principaux : Vermilion (46%), Total (29%), Lundin (15%), Géopétrol (5%) alors que la production française de gaz est opérée à 95 % par Total (UFIP, 2011).

La France dénombre huit raffineries et sept compagnies pétrolières qui sont propriétaires de ces installations (UFIP, 2014). Ces raffineries se différencient selon

(MEDDE, 2010) :

- Localisation/implantation ;
- la capacité de production annuelle de distillation (quantité maximale de matière brute que les unités de distillation d'une raffinerie sont capables de traiter en Mt/an) ;
- le schéma de raffinage (Hydroskimming : Distillation, Reformage, Hydrodésulfuration ; DRC : Distillation, Reformage, Craquage Catalytique, Hydrodésulfuration ; V : Viscoréduction ; A : Alkylation ; I : Isomérisation ; DHC : Hydrocraquage) ;
- Différentes particularités (productions de certains produits finis du pétrole).

Les produits finis du pétrole en raffinerie sont classés en trois catégories (UFIP, 2013) :

- Les carburants :
 - Les supercarburants utilisés pour le transport routier ;
 - Le gazole utilisé pour le transport routier, ferroviaire et maritime ;
 - Les carburateurs utilisés pour le transport aérien
- Les combustibles :
 - Le fioul domestique utilisé pour le chauffage domestique
 - Le fioul lourd utilisé pour la génération d'électricité, les usages énergétiques industriels ou le transport maritime
- Les produits de spécialité :
 - Les gaz de pétrole liquéfiés (le butane et le propane), aussi bien utilisés en tant que matière première dans l'industrie chimique que pour un usage domestique (transports, chauffage, cuisine...)
 - Les lubrifiants
 - Le bitume, utilisé comme liant dans les enrobés routiers
 - Le coke, utilisé pour l'élaboration de produits spécifiques, tels que les électrodes

Ces produits finis sont issus du processus de raffinage comportant trois types de transformations (UFIP, 2013) :

- La distillation qui permet de séparer les composants du pétrole brut en différentes coupes en fonction de leur point d'ébullition ;
- La conversion de ces composants, réalisée en général sous forte pression et haute température, selon le type :
 - De craquage, la cokéfaction et la viscoréduction : la division des molécules complexes en molécules plus simples pour convertir les fiouls lourds en produits plus légers ;
 - De reformage : la transformation de la géométrie des molécules associée à la production d'hydrogène ;
 - L'alkylation : la recombinaison des molécules pour constituer les composants nécessaires aux mélanges de la production d'essence ou de gazole ;
 - L'Isomérisation : le réarrangement de molécules pour l'obtention de composants d'essences à haut indice d'octane ;
- Le traitement afin de commercialiser des produits en stabilisant et séparant les composants indésirables tels que le soufre et les acides gazeux.

En France, le pétrole brut et les produits finis sont essentiellement transportés par voies maritimes (UFIP, 2013). Le pétrole brut est transformé en produits finis dans les raffineries et acheminé dans les dépôts pétroliers ou au client final directement par oléoducs, rail, route, voie fluviale (UFIP, 2013). La distribution se fait par deux canaux de vente (UFIP,

2013) :

- la vente en vrac ;
- la vente en station-service ;

Les réserves stratégiques de pétrole (SAGESS, 2013)

La gestion des stocks stratégiques est tripartite : l'Etat, le binôme décideur/opérationnel CPSSP/SAGESS et les opérateurs pétroliers. La SAGESS (Société Anonyme de Gestion de Stocks de Sécurité) est mandatée par le Comité Professionnel des Stocks Stratégiques Pétroliers (CPSSP). Cette société « a pour mission de constituer et conserver des stocks stratégiques de produits pétroliers afin de répondre aux obligations définies par les normes nationales et internationales. Les objectifs de la SAGESS sont notamment d'assurer un meilleur contrôle du respect de ces obligations, une répartition géographique des stocks de réserve, et d'améliorer la sécurité d'approvisionnements en cas de crise internationale ou intérieure ». Une partie des volumes de stocks stratégiques est assurée par les opérateurs pétroliers (les opérateurs ont choix de déléguer 56% ou 90 % de leur obligation de stockage au CPSSP). « L'autre partie est confiée au Comité Professionnel des Stocks Stratégiques Pétroliers (CPSSP), dont la mission exclusive est la constitution et la conservation de ces stocks stratégiques. LE CPSSP délègue la gestion opérationnelle de sa mission à la SAGESS. Le CPSSP et la SAGESS peuvent, ensemble, être considérés en France comme une agence nationale de stockage. » La chaîne logistique de la SAGESS est structurée à partir des enjeux de quantité, qualité et conformité des stocks (selon les différentes réglementations nationales et internationales). Cette chaîne est décrite en trois étapes :

- Achats de produits pétroliers, selon la typologie des produits (les stocks stratégiques concernent 4 catégories de produits pétroliers : les essences, le gazole et le fuel domestique, le carburéacteur et les fuels lourds. La SAGESS dispose de tous ces produits sauf de fuel lourd car la quantité stockée par les opérateurs est suffisante) ;
- Stockage des produits dans 120 dépôts et raffineries (conformément au plan de localisation approuvé annuellement en Commission Interministérielle des Dépôts d'Hydrocarbures (CIDH))

La logistique de la SAGESS repose sur des contrats d'entreposage sur l'ensemble du territoire Français avec les opérateurs pétroliers (excepté un dépôt à Chasseneuil dans la Vienne), sous forme de location, et sur de la sous-traitance des activités d'entreposage. Les produits de la SAGESS côtoient dans un stockage physique aussi bien les stocks propres des distributeurs pétroliers que les stocks stratégiques. Cela présente l'avantage de faciliter leur rotation par des échanges. Trois types de stockages se distinguent : les dépôts commerciaux, les raffineries et les cavernes souterraines. L'objectif des réserves stratégiques est de disposer dans chaque zone de défense à minima 10 jours de consommation pour les essences et 15 jours de consommation pour les gazoles/FOD. Le choix d'un site de réserves stratégiques se fait selon les critères suivants :

- la zone de chalandise du site (taille) ;
- les intérêts logistiques ;
- le risque financier de contrepartie ;
- risque de dépendance contrepartie ;
- l'exposition environnementale.

- Mise à disposition des stocks (sur demande du CPSSP ou sur injonction du Ministre chargé des hydrocarbures)

Le chemin du gaz naturel en France

Le gaz naturel représente 15 % du bilan Energétique en France (MEDDE, 2012). Les différents secteurs consommateurs de gaz sont : résidentiel (39%), l'industrie (38%), tertiaire (16%), énergie (8%) et enfin l'agriculture (1%) (MEDDE, 2012). Les principaux pays importateurs sont : Norvège (31%), Russie (15%), Algérie (16%), Pays-Bas (18%) (MEDDE, 2012). La production nationale est estimée à moins de 2% (principalement le gisement de Lacq) (MEDDE, 2012). La Direction Générale de l'Energie et du Climat, DGEC exerce plusieurs actions :

- La sécurité d'approvisionnement sur l'ensemble de la chaîne gazière ;
- Le contrôle et le suivi de **l'exploitation des gisements** d'hydrocarbures gazeux nationaux ;
- L'élaboration des règles générales concernant les activités gazières (MEDDE, 2012)

Cinq phases sont identifiées dans la chaîne logistique du gaz naturel :

- **Production nationale de gaz naturel**

Total exploite principalement le gisement de gaz naturel de Lacq en phase terminal d'exploitation (MEDDE, 2012).

- **Terminaux méthaniers**

Le GNL (Gaz Naturel Liquéfié) représente 30 % des approvisionnements (Gaz naturel rendu liquide par refroidissement à -160°C (MEDDE, 2012). Un quatrième terminal est en construction à Dunkerque (mise en service fin 2015) (DGEC, 2011).

- **Transport national de gaz naturel**

Le gaz naturel arrive en France par deux moyens :

- Gazoducs (Dunkerque, Taisnières, Obergailbac, Oltingue, Lacal) ;
- Méthaniers qui se dirigent vers les terminaux de regazéification (Deux à Fos sur Mer et 1 de Montoir de Bretagne)

Le gaz est alors transporté sous haute pression dans un réseau de transport qui se décompose fonctionnellement en deux parties :

- **Le réseau principal**, dit aussi réseau « **grand transport** » qui rejoint les points frontières avec les opérateurs étrangers et les stockages ;
Les points frontières (points interconnexions) permettent également d'assurer les transits vers d'autres pays ;
- **Le « réseau régional »** qui achemine le gaz naturel jusqu'aux distributions publiques et aux plus gros consommateurs industriels. »

Les canalisations possèdent des diamètres allant de 8 cm à 1,1 mètre diamètre pour même pression (67,7 bar généralement, variations possibles entre 25 et 80 bar). La pression est assurée par 32 stations de compression. Deux types de stations existent : les stations dites « de pointe » qui sont utilisées pour assurer l'alimentation des clients finaux et les stations dites de « ligne » qui permettent de réaliser les schémas d'approvisionnement demandés par les expéditeurs.

Le réseau de transport français est assuré par :

- GRTgaz (75% GDF-SUEZ et 25 % de la Société

d'Infrastructures Gazières)

- TIGF (100 % Total).

- **Stockage du gaz naturel français**

Trois raisons sont évoquées concernant le développement des stockages souterrains du gaz naturel français (MEDDE, 2012) :

- La saisonnalité de la demande de gaz naturel
- Assurer la sécurité d'approvisionnement
- Permettre une meilleure gestion du réseau de transport en favorisant l'équilibre du système de transport.

Deux types de stockages existent sur le sol Français : les stockages en nappe aquifère et les stockages en cavité saline.

Nappes aquifères (MEDDE, 2011) :

« La technique du stockage en nappe aquifère consiste à reconstituer l'équivalent géologique d'un gisement naturel en injectant le gaz dans une couche souterraine de roche poreuse et perméable contenant à l'origine de l'eau, recouverte d'une couche imperméable formant une couverture étanche, le tout ayant une forme de dôme. Pour des raisons de perméabilité des terrains et de conditions d'exploitation, une quantité de l'ordre de la moitié du gaz stocké reste à demeure dans le stockage : il s'agit du gaz coussin. Les contraintes géologiques ne permettant qu'un soutirage en continu assez peu flexible, ces stocks sont utilisés tout au long de l'hiver ».

Cavités salines (MEDDE, 2011) :

« La technique du stockage en cavités salines consiste à créer par dissolution à l'eau douce (lessivage) une « caverne » souterraine artificielle de grande taille dans une roche sédimentaire constituée pour partie de cristaux de chlorure de sodium (sel gemme) dont les propriétés physiques et chimiques, sa très faible porosité, son imperméabilité, sa neutralité chimique et ses bonnes caractéristiques de stabilité mécaniques, permettent le stockage de produits pétroliers liquides ou gazeux. Le soutirage pouvant être instantané, ces stockages sont utilisés pour répondre à des pics de demande. »

Deux opérateurs exploitent ces stockages (MEDDE, 2012) :

- Storengy, filiale de GdF, gère 12 stockages : 9 en nappes aquifères (centrés sur le bassin parisien) et 3 en cavité saline (Sud-est) = 79 % des capacités françaises ;
- TIGF, filiale de Total, gère 2 sites en nappes aquifères = 21 % des capacités françaises.

Dans anciens gisements d'hydrocarbures (=gisements épuisés, à l'étude) et les terminaux méthaniers sont également des lieux de stockages.

- **Distribution du gaz naturel**

La gestion d'un réseau public de distribution de gaz naturel est une activité qui relève du service public local dont les missions sont regroupées dans des **contrats de concession** conclus avec les collectivités locales, autorités concédantes de la distribution d'énergie en application de la loi du 15 juin 1906, soit dans des **règlements de services** pour les régis qui assurent une gestion communale directe de ces réseaux » (MEDDE, 2011). GrDF assure 96 % du marché de la distribution. Il existe 22 autres entreprises locales de distribution (DGEC, 2011).

Sécurité d'approvisionnement en gaz

La sécurité d'approvisionnement du gaz repose (intégrée dans la politique française en matière de sécurité d'approvisionnement en énergie) repose sur un ensemble de mesures distinguées ci-dessous (MEDDE, 2012) :

- Une diversification des sources et des voies d'approvisionnement, notamment avec 4 fournisseurs principaux (Norvège, Pays-Bas, Algérie et Russie) ;
- Des contrats de long terme = renforcement des relations avec les producteurs ;
- Des stocks souterrains de gaz ;
- Des obligations de service public pour les fournisseurs de gaz et gestionnaires d'infrastructures ;
- Des exercices réguliers de planification indicative pluriannuelle des investissements (afin de constater l'évolution de la consommation) ;
- Un dispositif de fournisseurs de dernier recours (à l'attention des clients non-domestiques assurant des missions d'intérêt général (MIG)) afin de garantir la continuité de l'approvisionnement ;
- Des mécanismes de gestion de crise (à l'intérieur du plan national d'urgence gaz).

Extrait Evaluation des risques susceptibles d'affecter la sécurité d'approvisionnement en gaz de la France (DGEC, 2011)

« La France a fait le choix de se doter de normes de sécurité d'approvisionnement en gaz contraignantes :

- le réseau gazier français est dimensionné pour faire face à un aléa climatique tel qu'il s'en produit tous les 50 ans (encore appelé risque 2% - « pointe P2 ») ;
- les fournisseurs sont tenus de justifier d'un niveau minimal de diversification de leurs sources et voies d'approvisionnement, et d'avoir accès à des volumes de gaz suffisants pour couvrir des aléas prédéfinis, notamment climatiques (voir annexe 3).

De plus, au-delà de 5% de part de marché, un fournisseur est tenu de diversifier les points d'entrée de son approvisionnement sur le territoire national. Enfin, un dispositif d'accès des tiers au stockage, sous forme de droits de stockage, a été mis en place afin que chaque fournisseur dispose en France, s'il le souhaite, de capacités de stockage nécessaires à la couverture de la modulation de la consommation de ses clients. Afin de garantir la continuité d'approvisionnement pour les clients domestiques et ceux exerçant des missions d'intérêt général, chaque fournisseur doit par ailleurs disposer d'une quantité minimale de gaz en stock en début d'hiver, à hauteur de 85% des droits liés à ses clients. » (Direction générale de l'énergie et du climat, 2011)

Bibliographie

Direction Générale de l'Énergie et du Climat, 2011, Rapport sur l'industrie pétrolière, gazière et des énergies dé carbonées en 2011

Electricité De France (EDF), 2013, site internet www.energie.edf.com dernier accès le 26/07/2013

Electricité De France (EDF) – Unité de Production Alpes, 2013, EDF – UP Alpes

Electricité Réseaux De France (ERDF), 2013, site internet www.erdfdistribution.fr dernier accès le 26/07/2013

GRTgaz, 2013, Plan décennal de développement du réseau de transport de GRTgaz 2013-2022

Ministère de l'industrie, de l'énergie et de l'économie numérique – Direction générale de l'énergie et du climat, 2011, Evaluation des risques susceptibles d'affecter la sécurité d'approvisionnement en gaz de la France

Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie (MEDDE), 2013, site internet www.developpement-durable.gouv.fr dernier accès le 26/07/2013

Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie (MEDDE), 2012, Dossier de Presse – Une obligation de capacité pour réduire la pointe électrique et garantir la sécurité d'approvisionnement

Réseau Transport d'Electricité (RTE), Les chemins de l'Electricité

Réseau Transport d'Electricité (RTE), 2013, site internet www.rte-france.fr dernier accès le 26/07/2014

Société Anonyme de Gestion de Stocks de Sécurité (SAGESS), 2013, site internet www.sagess.fr dernier accès le 26/07/2014

Union Française des Industries Pétrolières (UFIP), 2011, L'exploration – production d'hydrocarbures en France

Annexe 8

Activité essentielle « Transport »

L'organisation du réseau ferroviaire

Le réseau ferré national compte 29 000 km de lignes ouvertes à la circulation commerciale (valeur au 1^{er} janvier 2008). Ces lignes ouvertes comprennent :

- 1900 km de lignes à grande vitesse ouvertes ; utilisation au trafic de voyageurs
- 15 000 km d'autres lignes électrifiées (soit 52% du réseau national)

Les acteurs du ferroviaire sont listés et décrits en grandes catégories ci-dessous (RFF, 2013) :



- **Structuration du réseau**
 - **L'Etat** a pour rôle de :
 - Définir les orientations générales du réseau ;
 - Décider les grandes opérations d'aménagement ;
 - Participer au financement des projets et de la rénovation du réseau.
 - **Les Régions** sont des autorités organisatrices des transports régionaux depuis le 1^{er} janvier 2002. Elles ont pour rôle d'intervenir largement dans la définition des politiques de transport et le financement du développement du réseau, (notamment des contrats de projets Etat – Régions (CPER)) ;
- **Gestion et exploitation du réseau**
 - **Le Réseau Ferré de France (RFF)** (Etablissement Public à caractère Industriel et Commercial) est un acteur clé du système ferroviaire. Il est propriétaire et gestionnaire du réseau ferré national.
Son rôle est de définir les objectifs applicables en matière :
 - de gestion du trafic
 - de fonctionnement
 - d'entretien du réseau.

Son **activité commerciale** principale consiste à vendre des créneaux horaires permettant la circulation des trains d'un point à un autre.

La Direction de la circulation ferroviaire (DCF) est en charge depuis janvier 2010 d'assurer pour le compte de RFF les missions

de gestion du trafic et des circulations. « Cette entité indépendante au sein de la SNCF est garante d'un accès équitable au réseau, en toute transparence, pour toutes les entreprises ferroviaires. »

- **Maintenance et développement du réseau**
 - RFF est maître d'ouvrage de l'aménagement et du développement du réseau. Pour cela, il délègue les travaux de construction et de modernisation de ses infrastructures à des **entreprises mandataires** (SNCF, SCET, XELIS, SYSTRA, SETEC,...) en répondant aux exigences du gestionnaire. Des entreprises spécialisées participent à des grands projets d'infrastructure pour le compte de RFF.
 - Les activités de maintenance et renouvellement sur le réseau existant sont assurées, selon la loi, par **SNCF Infra (délégation de RFF)**.
- **Sécurité, développement durable et libre accès au réseau**
 - « **L'Etablissement Public de Sécurité Ferroviaire (EPSF)** assure, pour le compte du Ministère chargé des transports, le respect des règles de sécurité, l'homogénéité des conditions techniques et de sécurité de l'exploitation pour toutes les entreprises ferroviaires ».
 - « **L'Autorité de Régulation des Activités Ferroviaires (ARAF)**, créée par la Loi relative à l'organisation et à la régulation des transports ferroviaires (ORTF) en décembre 2009, est une autorité administrative indépendante chargée de garantir l'égalité de traitement entre tous les acteurs du système ferroviaire. »
 - « **L'Autorité de la qualité de service dans les transports**, installée le 16 février 2012, a pour objectif d'inciter les opérateurs à améliorer la qualité de service dans les transports par la publication d'indicateurs fiables sur la régularité, la ponctualité et la qualité de l'information diffusée aux voyageurs. Elle informe également les voyageurs, de manière claire et transparente, sur leurs droits et sur les démarches à accomplir en cas de retard ou d'annulation de train. »
 - **Acteurs européens (Commission, Parlement,..) et gestionnaires d'infrastructures européennes**

Le Fret Ferroviaire est ouvert à la concurrence sur tout le territoire depuis 2006. En 2010, SNCF Fret réalisait plus de 80% du fret ferroviaire (MEDDE, 2011). **Les services ferroviaires de voyageurs** sur le territoire national sont détenus par la SNCF (monopole) qui exploite les liaisons ferroviaires existantes TGV et Corail et met en œuvre les services TER définis par les régions (MEDDE, 2011). Il existe donc trois services de transport ferroviaire de voyageurs (SETRA, 2009) :

- Les services grandes lignes de trains à grande vitesse qui assurent des liaisons nationales et internationales ;
- Les services grandes lignes sur voies classiques : les services Corail ;
- Les services régionaux : les TER qui comprennent des services ferroviaires et des services routiers (taxi et autocar).

Infrastructure et installation du réseau ferroviaire : étude de la capacité d'un réseau ferroviaire

La notion de capacité ferroviaire est un concept à plusieurs dimensions d'après la définition de l'Union Internationale des Chemins de fer (cité dans SETRA, 2009) :

- Dimension nombre de trains que l'on peut faire circuler dans un intervalle de temps ;
- Dimension vitesse moyenne des trains ;
- Dimension stabilité des horaires qui représente la capacité d'une grille horaire ; à absorber les retards dus aux aléas d'exploitation ;
- Dimension hétérogénéité : plus les types de train qui circulent ont des vitesses différentes, moins de trains pourront circuler dans un même intervalle de temps

D'autres paramètres influencent la notion de capacité: la structure des horaires (correspondances,...), le niveau de qualité recherché, la longueur des trains et le nombre de niveaux du matériel roulant.

Les notions de capacité théorique et pratique d'une ligne et d'un nœud sont étudiées également (SETRA, 2009) :

- La Capacité théorique d'une ligne « le nombre maximum de trains que l'on peut faire circuler théoriquement sur une ligne pendant une période donnée » ;
- La Capacité théorique d'un nœud est « le nombre maximum de trains que l'on peut faire circuler théoriquement à travers le nœud considéré pendant une période donnée ;
- La Capacité pratique qui contient une marge de souplesse afin d'éviter la saturation et les retards en cascade en cas d'incidents.

La capacité ferroviaire est donc influence par un certains nombres d'éléments techniques (SETRA, 2009) :

- Réseau d'infrastructures
 - Les lignes ou sections de lignes ferrées (caractéristiques)
 - Il existe une classification des lignes en fonction du volume et du type de trafic supporté (établir par l'Union International des Chemins de fer UIC)
 - Les lignes ferroviaires comportent :
 - Une voie principale acceptant deux sens de circulation des trains
 - Deux voies principales ou plus (ligne à double voie)

Les lignes sont caractérisées par **la vitesse limite et l'électrification des lignes**. En France, 52% des lignes du réseau ferré national sont électrifiées et écoulent 90% des voyageurs.

Les lignes sont principalement alimentées en courant alternatif 25000 Volts/50Hz.

- Les gares qui sont la propriété de la SNCF et qui joue le rôle de pôle d'interconnexion des réseaux de transport (selon leur importance : niveau de service de l'offre ferroviaire, fréquentation de la gare,.. et leur ancrage territorial)
- Capacité du matériel roulant
 - Matériel spécifique des trains à grande vitesse : TGV

Principe de rame automotrice électrique articulée et indéformable composée de deux motrices encadrant des voitures

- Variété du matériel assurant les liaisons intercités et régionales (caractéristiques d'accélération et freinage différent)
- Contraintes d'exploitation
 - Temps d'arrêt minimum
 - Correspondances
 - Espacement des trains
 - Maintenance des voies
 - Mouvement de manœuvre
 - Stationnement et entretien des trains
 - Liaisons transfrontalières
 - Contraintes des organisations des entreprises ferroviaires
 - Locomotives
 - Disponibilité des rames
 - Gestion du personnel
 - Règles et procédures applicables en cas d'accidents
 - L'objectif est de maximiser la capacité tout en garantissant une bonne robustesse d'exploitation

Organisation et infrastructures du réseau routier

En France, il existe différents types de voies. Les 5 types sont décrits ci-dessous (MEDDE, 2011) :

- **Voie communale** appartenant aux communes ;
- **Routes départementales** appartenant aux départements ;
- **Routes nationales** appartenant à l'Etat – ministre chargé des transports
- **Les autoroutes non concédées** (=autoroutes sans péages). Appartenant à l'Etat ;
- **Les autoroutes à péage.** Appartenance à l'Etat (via Direction Générale des Infrastructures, des Transports et de la mer, DGITM) mais contrats de concession à des sociétés concessionnaires d'autoroutes (en contrepartie de la perception d'un péage) qui gèrent le financement, la construction, l'entretien et l'exploitation.

Dix-huit sociétés concessionnaires d'autoroutes sont répertoriées en France (MEDDE, 2013) afin d'exploiter 8798 km d'autoroutes.

Les services routiers de l'Etat (construction et entretien des autoroutes et routes nationales) sont au nombre de deux :

- **11 directions interdépartementales des routes (DIR)**
 - Assurent la viabilité du réseau en période hivernale, l'entretien quotidien des voies (fauchages, signalisation,...), la surveillance des voies, l'entretien de tout le patrimoine routier (chaussée, tunnels, viaducs,...), la gestion du trafic et l'information des usagers.
- **21 Services régionaux de maîtrise d'ouvrage (SMO),** placés à l'intérieur des DREAL afin de piloter les projets neufs.

Organisation et infrastructures du réseau fluvial

Le domaine public fluvial français compte 8500 km (fleuves, rivières, canaux) de voies navigables sur 18 000 km de voies d'eau. La plus grande partie du réseau est gérée par l'établissement public Voies navigables de France : 6700 km de voies navigables (dont 4100 km de réseau magistral utilisé pour le transport de marchandises et 2600 km de réseau régional, plutôt dédié au tourisme). Ce réseau comporte de nombreux ouvrages d'art :

- 400 barrages de navigation ;
- 1799 franchissements de chute (écluse(s), échelle(s) d'écluse(s), pente d'eau) ;
- 637 ouvrages de décharges (déversoir, siphon, vanne, etc.) ;
- 83 portes de garde ;
- 389 systèmes alimentaires (barrage-réservoir, rigole, station de pompage, contournement d'écluse...), 28 tunnels-canaux, 125 ponts canaux et 806 ouvrages de franchissement (pont, aqueduc, etc.).

Le reste du réseau navigable est géré par des concessionnaires comme la Compagnie nationale du Rhône, l'Etat ou les collectivités locales (MEDDE, 2013). Deux ports autonomes fluviaux sont dénombrés: Paris et Strasbourg. Il existe sept ports maritimes: Dunkerque, le Havre, Rouen, Nantes St Nazaire, La Rochelle, Bordeaux et Marseille qui réalisent 80 % du trafic maritime de marchandises.

Organisation de la logistique

Quatre grands types de logistique existent :

- **La logistique amont** ou d'approvisionnement qui assure la circulation des produits entrants et sortants des sites de production ;
- **La logistique interne** à l'intérieur du site de production ou d'assemblage ;
- **La logistique aval** qui répond à l'approvisionnement des réseaux de distribution ;
- **La logistique inverse** ou retour ;

Il existe plusieurs **maillons** dans la chaîne logistique amenant différents modèles d'organisation :

- Unité de production ;
- Centre de distribution national /international ;
- Centre de transformation ;
- Centre de distribution urbain / local ;
- Point de ventes – destinations finales.

Différents opérateurs interviennent dans la **chaîne logistique** :

- Les commissionnaires de transport (organisateur de transports sous leur propre nom) ;
- Les transporteurs (entreprises commerciales de transport de marchandises) ;
- Les transitaires (entreprises mandatées assurant la continuité du transport) ;
- Les prestataires logistiques pour compte d'autrui

Le transport intérieur terrestre de marchandises est assuré à 88,2% par la mode routier, 9,6% par le fer et 2,2 % par la voie fluviale (Compte des transports en 2011 CCTN juillet 2012 cité dans MEDDE, 2013).

Par ailleurs, les notions d'entrepôt et de plate-forme peuvent être distinguées (MEDDE, 2013) :

- **Un entrepôt** est « un bâtiment dans lequel les marchandises sont stockées plus de 24 heures. Ces entrepôts sont munis d'étagères pour le rangement des palettes ou des colis. »
- **Une plate-forme** est « un bâtiment dans lequel les marchandises sont stockées sur durée de temps limitée (moins de 24 h), dans le cadre d'une opération de dégroupage/groupage. Une plate-forme n'est pas équipée d'étagères, les marchandises restant sur le quai dans l'attente de leur prise en charge. »

Il apparaît que des bâtiments logistiques sont à la fois des entrepôts et des plates-formes (fréquent dans la grande distribution). D'autre part, **des catégories de bâtiments logistiques** établis selon le rayon de dessert, la taille de l'entrepôt et les critères de positionnement sont listées :

- Entrepôt de distribution européenne ;
- Plate-forme de groupement-éclatement ;
- Entrepôt à vocation régionale ou locale ;
- Plate-forme de messagerie ;
- Plate-forme de distribution urbaine ;
- Entrepôt de stockage avancé d'un industriel ;
- Site de « post-manufacturing ».

Trois grands types de réseau d'entrepôts existent (MEDDE, 2013) :

- **Le réseau en trompette**

Fournisseurs => Centre de distribution => plate-forme régionale => point de vente

- **Le réseau en entonnoir**

Fournisseurs => plate-forme de groupage-éclatement=> site d'expédition ou usine

- **Le réseau de type messagerie ou « cross-docking »**

Flux aux origines/destinations différentes => plate-forme groupage et dégroupage=>expédition

La liste des ouvrages d'infrastructure de transport soumis à des études de dangers (Arrêté du 15 juin 2012)

Quatre types d'ouvrages sont soumis à des études de dangers :

- Les aires routières de stationnement ouvertes à la circulation publique et au stationnement de véhicules de transport de matières dangereuses (Article 1) : 22 aires concernées ;
- Les sites de séjour temporaires ferroviaires, tels que gares de triage ou faisceaux (Article 2) : 4 sites concernés ;
- Les ouvrages où stationnent, sont chargés ou déchargés des véhicules ou engins de transport contenant des matières dangereuses des ports intérieurs (Article 3) : 4 ports concernés ;
- Les ouvrages où stationnent, sont chargés ou déchargés des véhicules ou engins de transport contenant des matières dangereuses des ports maritimes (Article 3) : 4 ports concernés.

Bibliographie

Direction générale de l'Aviation civile, 2012, Observatoire de l'aviation civile 2010-2011 – TOME 1

Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie (MEDDE), 2013, La logistique tour d'horizon

Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie (MEDDE), 2013, site internet www.developpement-durable.gouv.fr dernier accès le 30/07/2013

Réseau Ferré de France (RFF), 2013, site internet www.rff.fr dernier accès le 30/07/2013

Service d'Etudes sur les Transports, les Routes et leurs Aménagements (SETRA), 2009, Synthèse des connaissances – Le transport ferroviaire de voyageurs sur le réseau ferré national français / Exploration d'un système complexe

Annexe 9

Extrait des fonctions utilisées dans le modèle

Capter eau du milieu naturel
Transporter eau du milieu naturel
Traiter eau du milieu naturel
Stocker l'eau potable
Distribuer eau potable
Relever l'eau potable
Pressuriser l'eau potable
Echanger l'eau potable
Chlorer l'eau potable
Collecter les eaux usées
Traiter les eaux usées
Analyser les eaux destinées à la consommation humaine
Superviser le réseau d'eau potable
Transmettre les informations du centre de pilotage réseau d'eau potable
Superviser le réseau d'assainissement
Transmettre les informations du centre de pilotage réseau des eaux usées
Traiter (diagnostic et soins) les patients
Organiser les activités des produits sanguins (Concentrés de Globules Rouges, Concentrés Plaquettaire, Plasma d'Aphérèse)
Produire les produits essentiels de santé (médicaments à usage humain et les dispositifs médicaux)

Stocker les produits essentiels de santé (médicaments à usage humain et les dispositifs médicaux)
Piloter la nation en cas de crise
Transmettre les informations en cas de crise à l'échelle nationale
Piloter la ZDS en cas de crise
Transmettre les informations de la ZDS
Piloter le département en cas de crise
Transmettre les informations de la préfecture
Piloter la commune en cas de crise
Transmettre les informations de la commune
Produire de l'électricité
Transformer et aiguiller l'électricité HTB
Transporter l'électricité HTB
Transformer et aiguiller l'électricité HTB/HTA
Distribuer l'électricité HTA
Superviser le réseau de transport d'électricité
Transmettre les informations du centre de supervision du réseau de transport d'électricité
Superviser le réseau de distribution d'électricité
Transmettre les informations du centre de supervision du réseau de distribution d'électricité
Transformer le GNL
Stocker le Gaz naturel
Transporter le gaz naturel
Distribuer le gaz naturel
Comprimer le gaz naturel
Echanger le gaz naturel
Piloter le réseau de transport de gaz naturel
Transmettre les informations du centre de supervision du réseau de transport de gaz naturel

Piloter le réseau de transport de gaz naturel
Transmettre les informations du centre de supervision du réseau de distribution de gaz naturel
Transformer le pétrole brut en essences
Transformer le pétrole brut en gazole
Transformer le pétrole brut en fioul domestique
Transformer le pétrole brut en carburéacteur
Transporter les essences
Transporter le gazole
Transporter le fioul domestique
Transporter le carburéacteur
Stocker les essences
Stocker le gazole
Stocker le fioul domestique
Stocker le carburéacteur
Pomper les essences
Pomper le gazole
Pomper le fioul domestique
Pomper le carburéacteur
Dispatcher les essences
Dispatcher le gazole
Dispatcher le fioul domestique
Dispatcher le carburéacteur
Distribuer le fioul domestique
Distribuer les essences
Distribuer le gazole
Déplacer les individus par le transport ferroviaire

Déplacer les individus par le transport aérien
Déplacer les individus par le transport routier
Déplacer les individus par le transport urbain
Déplacer les individus par le transport fluvial
Transporter les essences par le transport routier
Transporter le gazole par le transport routier
Transporter le fioul domestique par le transport routier
Transporter le carburéacteur par le transport routier
Transporter les produits essentiels de santé par le transport routier
Transporter les produits alimentaires de première nécessité par le transport routier
Transporter les essences par le transport ferroviaire
Transporter le gazole par le transport ferroviaire
Transporter le fioul domestique par le transport ferroviaire
Transporter le carburéacteur par le transport ferroviaire
Transporter les produits essentiels de santé par le transport ferroviaire
Transporter les produits alimentaires de première nécessité par le transport ferroviaire
Transporter les essences par le transport fluvial
Transporter le gazole par le transport fluvial
Transporter le fioul domestique par le transport fluvial
Transporter le carburéacteur par le transport fluvial
Transporter les produits essentiels de santé par le transport fluvial
Transporter les produits alimentaires de première nécessité par le transport fluvial
Transporter les produits essentiels de santé par le transport aérien
Transporter les produits alimentaires de première nécessité par le transport aérien

Annexe 10

Extrait des éléments essentiels utilisés dans le modèle

Station de captage eau du milieu naturel
Station de production eau du milieu naturel
Canalisation de transport d'eau potable
Nœuds de connexion entre les canalisations de transport d'eau potable
Aqueduc
Station de transfert eau du milieu naturel
Station de chloration
Station de pompage
Station de surpression
Canalisation de distribution d'eau potable
Nœuds de connexion entre les canalisations de distribution d'eau potable
Canalisation des eaux usées
Station d'épuration
Centre de supervision/pilotage du réseau d'eau potable
Centre de supervision/pilotage du réseau des eaux usées
Etablissement de santé (centre hospitalier universitaire, centre hospitalier,...)
Etablissement régional de l'EFS
Site de productions de produits essentiels de santé

Dépôt de produits essentiels (Site des logisticiens dépositaires pharmaceutique,...)
Préfecture de département
Ministère de l'intérieur
COZ
Centrale nucléaire
Centrale hydroélectrique
Centrale thermique
Poste de transformation/aiguillage HTB (400KV/225 KV, 225KV/90KV,..)
Ligne électrique HTB
Nœud de connexion ligne électrique HTB
Centre de supervision du réseau de transport d'électricité
Poste de transformation/aiguillage HTB/HTA (=poste source)
Ligne électrique HTA
Nœud de connexion ligne électrique HTA
Centre de supervision du réseau d'électricité à l'échelle régionale
Terminal méthanier
Centre de stockage de gaz naturel
Gazoduc
Station de compression gaz naturel
Nœuds de connexion entre les gazoducs
Canalisations de distribution de gaz naturel
Nœuds de connexion des canalisations de gaz naturel

Centre de supervision national du gaz naturel
Centre de supervision régional du gaz naturel
Raffinerie
Oléoduc
Poste d'interconnexion entre oléoducs
Station de pompage des produits finis du pétrole
Stockage souterrain d'hydrocarbures/Dépôt pétrolier
Station-service
Autoroute concédée ou non-concédée
Echangeur autoroutier
Route nationale
Echangeur routier
Route départemental
Route communale
Ligne ferroviaire à grande vitesse
Nœuds connexion lignes ferroviaires à grande vitesse
Ligne ferroviaire
Nœuds de connexion lignes ferroviaires
Gare de triage
Gare ferroviaire de voyageurs

Port intérieur
Voie navigable
Port maritime
Aéroport
Dépôt de produits alimentaires de première nécessité (Entrepôt de distribution européenne, plate-forme de groupement-éclatement, entrepôt à vocation régionale ou locale,...)
Usine de production d'aliments de première nécessité
Eléments des télécommunications fixes
Eléments des télécommunications mobiles
Eléments des télécommunications satellite
Eléments des télécommunications internet

Annexe 11

Cartes des éléments essentiels du TcAE pilote de l'activité essentielle Energie

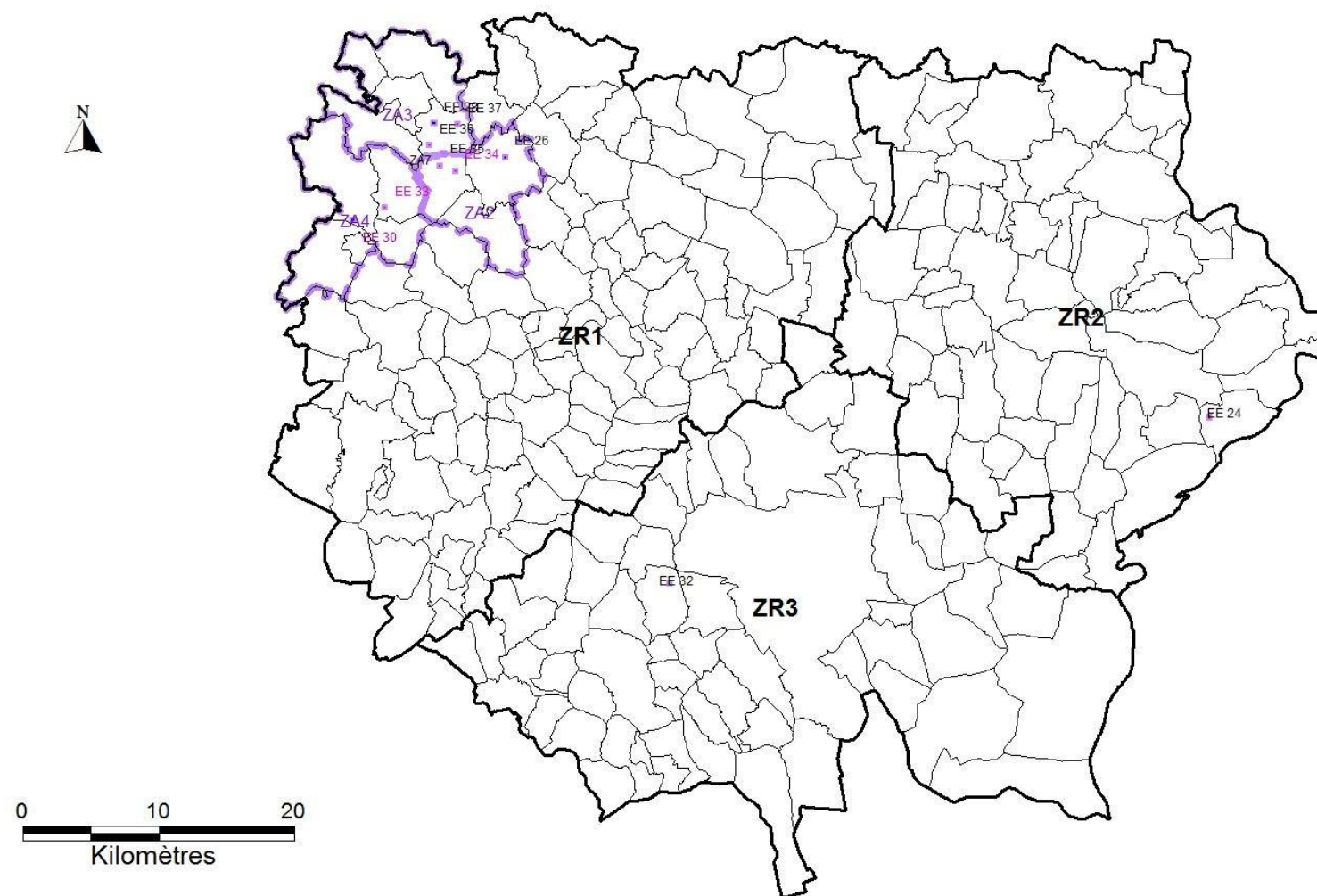


Figure 94 : Eléments essentiels de l'activité essentielle de l'énergie

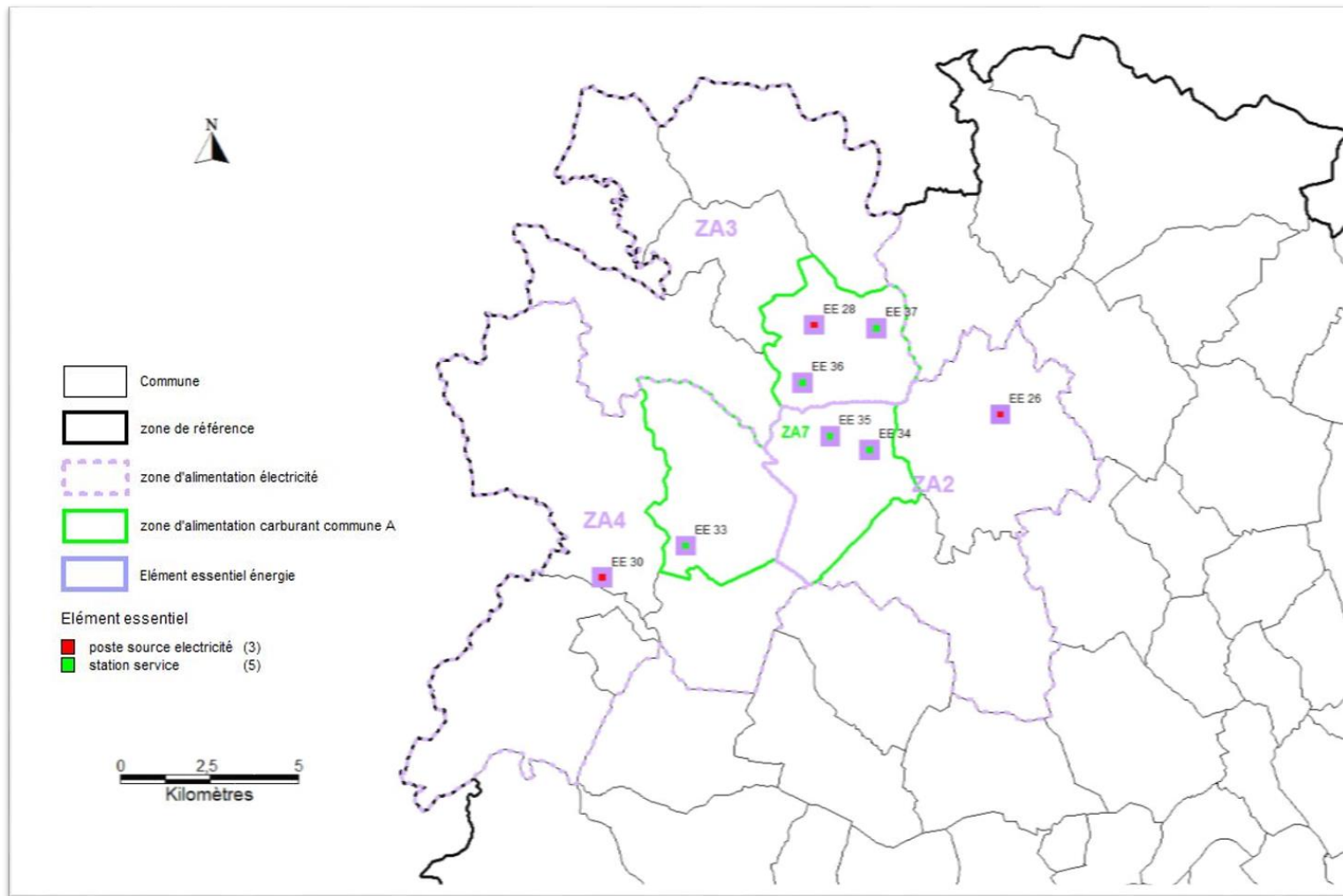


Figure 95 : Eléments essentiels de l'activité d'énergie (zone restreinte)

NNT : 2015 EMSE 0781

Benjamin REY

Systemic resilience of territory composed of essential activities – Spatial and systemic approaches

Speciality : Environmental Engineering

Keywords : Systemic resilience, critical infrastructures, interdependency, systemic approach, spatial approach

Abstract :

Too many dramatic events occurred over the last ten years have demonstrated the severity and extent of impacts that territories may be confronted with. Damages to critical infrastructures may have a variety of downfall disturbing effects, which can lead territories and society into a huge crisis. Interdependency between these essential activities on the one hand, and between these activities and the population on the other hand, increases their vulnerability. This thesis presents a methodology to better assess direct and indirect impacts of a major disturbance. The issue is addressed from a multi-activity perspective, to take into account territories complexity.

In the first stage, a territory is modeled using existing interdependency links between essential activities and the population. The methodology then identifies, based on a defined initial event, possible propagation scenarios and their consequences on services “users”. Finally, this simulation gives an assessment of the territory stakes resilience. This work provides a decision-making tool for the development of activity continuity plans, or risk assessment and mitigation policies.

NNT : 2015 EMSE 0781

Benjamin REY

Résilience systémique d'un territoire composé d'activités essentielles – Approches systémique et spatial

Spécialité: Génie de l'environnement

Mots clefs : Résilience systémique, infrastructures critiques, interdépendances, approche systémique, approche spatiale

Résumé :

De trop nombreux évènements survenus la décennie passée illustrent la gravité et l'étendue des impacts auxquels les territoires peuvent être confrontés. L'atteinte aux infrastructures critiques peut induire de très nombreux dysfonctionnements en cascade pouvant plonger ce territoire et sa société dans une crise de grande ampleur. Les interdépendances entre ces activités essentielles et celles avec la population accentuent leur fragilité. Afin d'évaluer les impacts directs et indirects d'une perturbation majeure, la méthodologie développée étudie la problématique sous un angle multisectoriel répondant ainsi à une prise en compte de la complexité des territoires.

Dans un premier temps, le territoire via ses activités essentielles et sa population est modélisé en s'appuyant sur les liens d'interdépendance existants. Sur la base d'un évènement initial donné, la méthode identifie les scénarios de propagation possibles et leurs conséquences sur les "usagers" concernés par la délivrance des services touchés. Cette simulation permet ainsi d'apprécier la résilience systémique des enjeux du territoire. Basé sur une approche systémique et spatiale, ce travail a pour objectif de fournir une aide à la décision à la planification des mesures de continuité et de rétablissement d'activité ou à la mise en place de mesures de traitement des risques.